Tecnologia Industrial I

Materials

Jordi Orts

Tecnologia Industrial I
Materials.
Jordi Orts

1a Edició, octubre 2020

Aquest llibre ha estat redactat íntegrament amb LibreOffice, i ha estat maquetat especialment per a la seva visualització amb netbooks, lectors d'ebooks i tablets, i exportat a PDF amb aquesta mateixa eina. Les imatges han estat retocades amb GIMP.

Trobareu la darrera versió d'aquesta obra a la web de l'autor: http://www.jorts.net

Índex

. Estructura de la matèria

Un enginyer ha d'escollir els materials que fa servir segons els requisits del seu ús. Les propietats d'aquests materials depenen de la seva estructura interna. Conèixer aquesta estructura és fonamental per entendre les propietats i per aconseguir nous materials amb un conjunt de propietats. Actualment la ciència i enginyeria de materials és una de les disciplines amb més interès, recolzada per les universitats més prestigioses.

Organització atòmica

Com heu estudiat a 3r d'ESO, els àtoms poden interaccionar mitjançant diferents tipus d'enllaços: iònic, covalent, metàl·lic ... El tipus d'enllaç dependrà de l'estructura atòmica dels elements constituents. Un bon coneixement de la taula periòdica[PT2020] és important.

Aquests enllaços permeten organitzar la matèria en molècules, sòlids cristal·lins ... Moltes propietats es poden derivar d'aquesta organització. Per exemple, ja vau veure a 3r d'ESO que els cristalls iònics son durs i fràgils, amb un punt de fusió alt, aïllants però conductors quan es fonen ...

Segons l'ordre aconseguit poden classificar el compost:

- Sense ordre
  - gasos inerts
- Ordre de curt abast
  - alguns gasos (H_20)
  - líquids
  - sòlids amorfs (vidre)
- Ordre de llarg abast
  - sòlids cristal·lins

Sòlids

La majoria de materials que selecciona un enginyer son sòlids, per això ens centrarem en aquest tipus de materials. Com heu vist trobarem sòlids amorfs i sòlids cristal·lins.

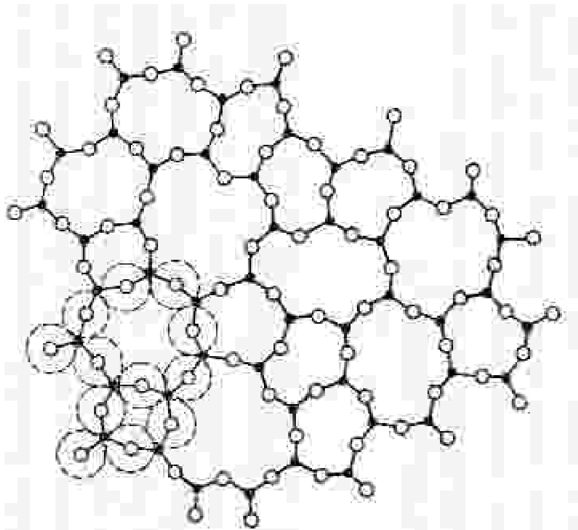


Figura 1: Sòlid amorf: sílice en estat vitri. Font: CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1374352

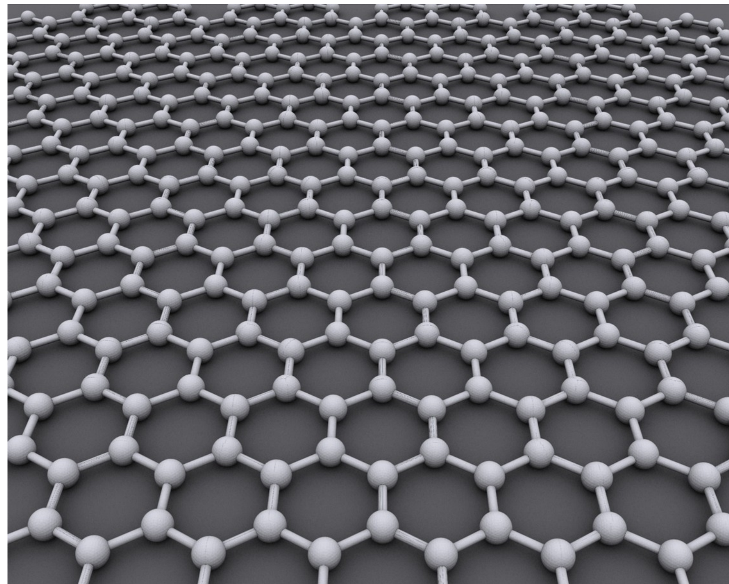


Figura 2: Estructura cristal·lina del grafè. Font: By AlexanderAlUS CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11294534

Fixeu-vos en l'estructura del vidre. No es repeteix periòdicament. Per molt que a la nostra vida quotidiana diem cristall per anomenar el vidre, el vidre és un sòlid amorf, no cristal·lí. Els sòlids amorfs es poden considerar com a líquids amb una viscositat altíssima. Prova d'això son les deformacions observables a vidres de finestres centenàries de masies i esglésies: s'aprecia òpticament un

engrossiment a la part inferior del vidre, que actua com a lent, deformant les imatges.

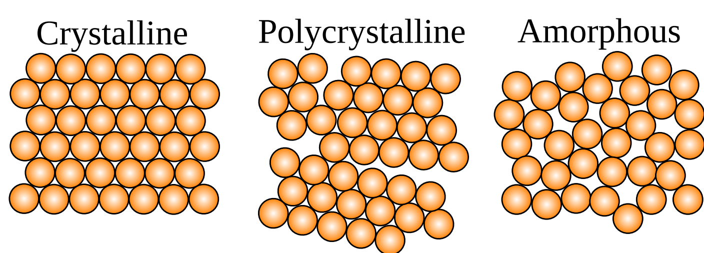


Figura 3: monocristall, policristall i amorf. Font: Cdang, Sbyrnes321 CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17676267

Quan el sòlid no és un únic cristall sinó un agregat de petits cristalls parlem de *policristall*. Aquests petits cristalls s'anomenen *cristal·lites* o *grans cristal·lins*, que poden tenir mides d'entre 1 i 2 micres fins a uns quants mil·límetres, fins-i-tot uns quants metres.

Estructures cristal·lines

L'estudi d'aquestes estructures sempre ha fascinat als científics, ja que molts minerals presenten aquest tipus d'ordenació. El més sorprenent és que, donada la seva simetria, únicament existeixen 7 sistemes cristal·lins, que presenten només 14 models de xarxes tridimensionals invariants sota translacions, anomenades *xarxes de Bravais*.

Sistema cristal·lí	**Eixos**	**Angles entre els eixos**
Cúbic	a = b = c	α = β = γ = 90°;
Tetragonal	a = b ≠ c	α = β = γ = 90°
Ortoròmbic	a ≠ b ≠ c ≠ a	α = β = γ = 90°
Hexagonal	a = b ≠ c	α = β = 90°; γ = 120º
Trigonal (o romboèdric)	a = b = c	α = β = γ ≠ 90°
Monoclínic	a ≠ b ≠ c ≠ a	α = γ = 90°; β ≠ 90°
Triclínic	a ≠ b ≠ c ≠ a	α ≠ β ≠ γ (tots diferents de 90°)

Ens centrarem en les xarxes de Bravais cúbiques (simple, BCC i FCC), tetragonals (simple i centrada en el cos) i hexagonal (a la qual normalment ens referirem com hexagonal compacta o HCP), ja que són les més típiques que trobarem, especialment als metalls.

Són moltes les propietats que podrem deduir de l'estructura cristal·lina als metalls, com per exemple la seva mal·leabilitat i ductilitat, ja que poden reorganitzar-se al lliscar els àtoms entre sí mantenint la cohesió entre ells.

Cal ressaltar que un mateix compost pot presentar diferents estructures cristal·lines, en funció de paràmetres com ara la pressió o temperatura. Un exemple és el titani, que podem trobar amb ordenacions HCP i BCC, o el ferro, que trobarem amb estructures BCC i FCC.

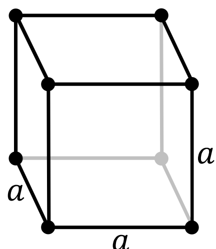


*Figura 4: Cel·la **cúbica simple**. Font: By Daniel Mayer, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735632*

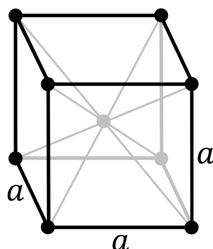


*Figura 5: Cel·la **cúbica centrada a les cares (BCC)**. Font: By Daniel Mayer, DrBob, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735630*

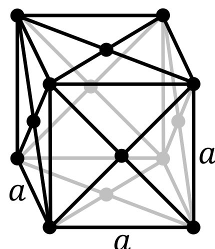


*Figura 6: Cel·la **cúbica centrada en les cares (FCC)**. Font: By Daniel Mayer, DrBob, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735631*

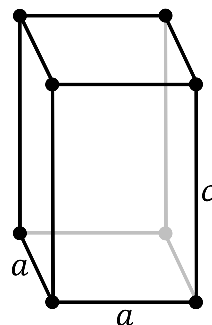


*Figura 7: Cel·la **tetragonal simple**. Font: By Daniel Mayer, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735642*

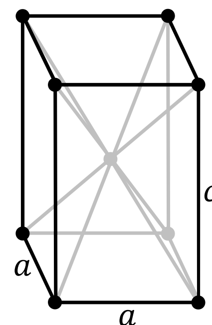


*Figura 8: Cel·la **tetragonal centrada en el cos**. Font: By Rocha, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735641*

Si un mateix compost es pot donar en diferents xarxes de Bravias implica la possibilitat d'un canvi de fase sense que es produeixi un canvi d'estat. Per exemple, el Fe β (estructura BCC) passa a Fe γ (estructura FCC) als 750 °C. Com veieu, tots dos són sòlids, però la temperatura es manté constant a 750 °C mentre es produeix el canvi de fase i tot el Fe β es reorganitza i es converteix en Fe γ. Com veieu, la natura és rica en sorpreses!

Més sorprenent és que als 1400 °C el Fe γ presenta un nou canvi de fase, a Fe δ, tornant a presentar una estructura BCC però amb un paràmetre de xarxa *a* (distància entre cel·les) diferent al Fe β.

Fixeu-vos que la cel·la hexagonal en realitat no és un hexàgon: aquest es forma amb 3 cel·les.

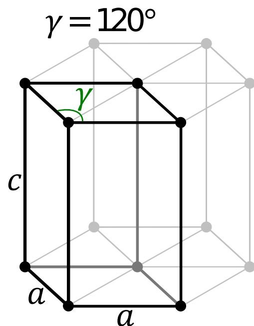


Figura 9: Cel·la ***hexagonal****.* *Font: By Bor75 CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24101066*

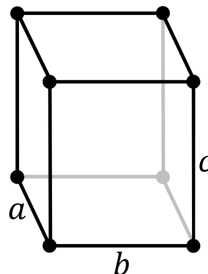


Figura 10: Cel·la ***ortoròmbica simple****.* *Font: By Daniel Mayer, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735640*

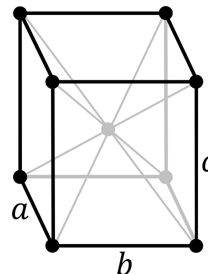


Figura 11: Cel·la ***ortoròmbica centrada al cos****.* *Font: By DrBob, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735638*

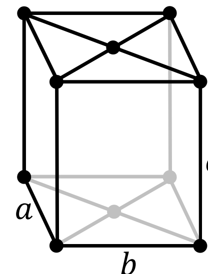


Figura 12: Cel·la ***ortoròmbica centrada a les bases****.* *Font: By DrBob, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735637*

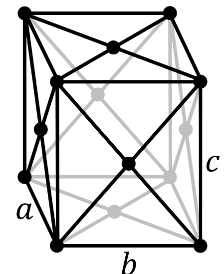


Figura 13: Cel·la ***ortoròmbica centrada a les cares****.* *Font: By Rocha, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735639*

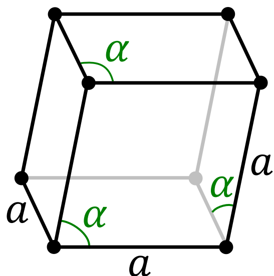


Figura 14: Cel·la ***romboèdrica****. Font: By Daniel Mayer, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1723409*

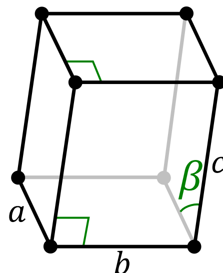


Figura 15: Cel·la ***monoclínica****. Font: By Daniel Mayer, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735636*

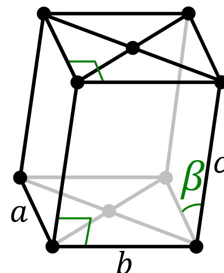


Figura 16: Cel·la ***monoclínica centrada a les bases****. Font: By DrBob, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735635*

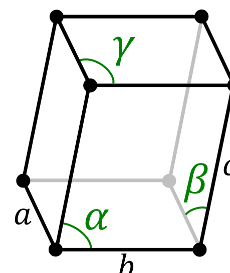


Figura 17: Cel·la ***triclínica****. Font: By DrBob, Stannered CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1735643*

Aplicació als metalls

Podem considerar l’estudi dels sòlids cristal·lins metàl·lics com un problema matemàtic d’empaquetament de boles sòlides. Aquest estudi és molt senzill a les estructures cúbiques.

Primer anem a veure quants àtoms caben a la cel·la unitat (*N*), suposant cada àtom com una bola sòlida amb un radi igual al radi atòmic, i la mida del costat d’aquesta cel·la (paràmetre de xarxa *a*):

CS

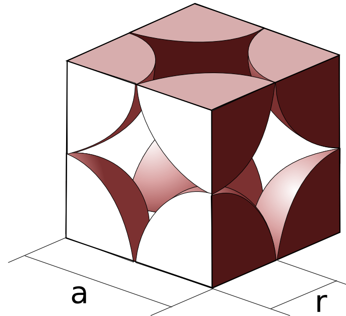


Figura 18: Àtoms per cel·la CS. Font: By Cdang, Samuel Dupré, Daniele Pugliesi CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11106992

$$N=8\cdot\frac{1}{8}=1$$

$$a=2\cdot r$$

FCC

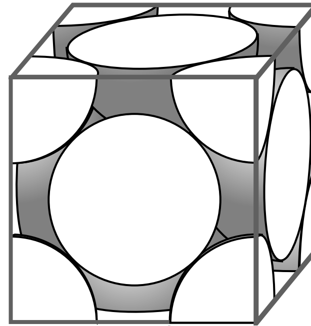


Figura 19: Àtoms per cel·la FCC. Font: By Cdang CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6445504

$$N=8\cdot\frac{1}{8}+6\cdot\frac{1}{2}=4$$

$$a=\frac{4}{\sqrt{2}}\cdot r$$

BCC

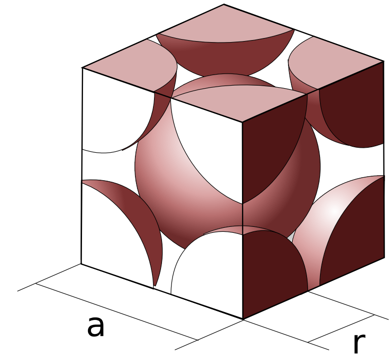


Figura 20: Àtoms per cel·la BCC. Font: By Cdang, Samuel Dupré, Daniele Pugliesi CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11106686

$$N=8\cdot\frac{1}{8}+1\cdot 1=2$$

$$a=\frac{4}{\sqrt{3}}\cdot r$$

Per tant en una cel·la de volum a^3 tenim N àtoms. Com cada mol té N_A (nombre d'Avogadro) àtoms i pesa en grams A (massa atòmica) podem fe una estimació de la densitat:

$$\rho = \frac{N \cdot A}{a^3 \cdot N_A}$$

Molt interessant és l'anomenat factor d'empaquetament (APF), que ens indica com de plena està la cel·la:

$$APF = \frac{N \cdot V_{àtom}}{V_{cel \cdot la}}$$

Als metalls, el APF de les cel·les FCC és el més eficient possible (0,74). Les cel·les BCC tenen un APF de 0.68 i les cel·les CS de 0.52. Els metalls que només tenen un enllaç de tipus metàl·lic s'empaqueten amb la màxima eficiència. Els que tenen un enllaç mixt, com el ferro, poden tenir cel·les amb un empaquetament inferior. Cap metall comú utilitzat a enginyeria té l'estructura CS, encara que aquesta es troba en materials ceràmics.

A l'estructura HCP, els metalls ideals tenen una relació $c/a = 1.633$ que ens porta al mateix APF 0,74 de les cel·les FCC, per la qual cosa molts metalls adopten aquesta estructura. En aquesta xarxa el volum de la cel·la és $V = a^2 \cdot c \cdot \cos(30^0)$.

Xarxa	Paràmetres de xarxa	Àtoms per cel·la	APF	Metalls típics
Cúbica simple (CS)	$a=2\cdot r$	1	0,52	Cap
Cúbica centrada en les cares (FCC)	$a=\frac{4}{\sqrt{2}}\cdot r$	4	0,74	Fe, Cu, Al, Au, Ag, Pb, Ni, Pt
Cúbica centrada en el cos (BCC)	$a=\frac{4}{\sqrt{3}}\cdot r$	2	0,68	Fe, Ti, W, Mo, Nb, Ta, K, Na, V, Cr, Zr
Hexagonal compacta (HCP)	$a=2\cdot r$ $c=1{,}633\cdot a$	2	0,74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Cd

El diamant i el grafit

No podríem trobar millor exemple de com l'organització cristal·lina d'un mateix element, en aquest cas el carboni, pot canviar radicalment les propietats del material. A una banda, el diamant, el material natural més dur (10 a l'escala de Mohs), a l'altre, el grafit, amb una duresa tan baixa (entre 1 i 2 a la mateixa escala) que el fem servir als nostres llapis per escriure. Tots dos amb enllaç covalent. On és, doncs, la diferència?

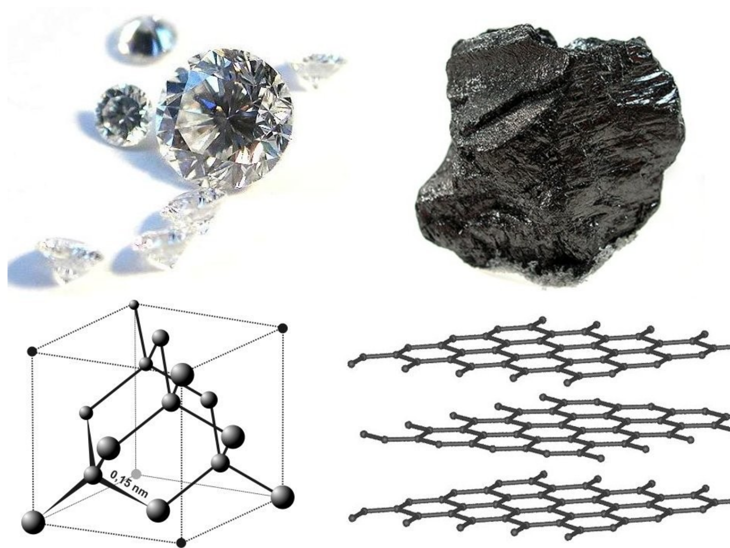


Figura 21: Estructura del diamant i del grafit. *Font: By Itub, Materialscientist CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7223557*

Al diamant trobem una estructura cúbica on les distàncies entre àtoms és sempre la mateixa, formant tetraedres. Tenint en compte el caràcter covalent de l'enllaç, aquesta és una estructura molt cohesionada, d'aquí la seva gran duresa i la seva condició d'aïllant elèctric.

Al grafit, en canvi, trobem estructures planes hexagonals apilades però separades molt entre elles. Com veieu a la figura la cohesió a l'eix *z* és molt més feble que als altres eixos.

A temperatura i pressions estàndard el carboni adopta la forma del grafit. Únicament amb grans pressions i temperatures adopta la forma de diamant. Per això és més fàcil trobar grafit que diamants. De fet el diamant és una fase *metaestable* del grafit, però amb una velocitat de conversió negligible a efectes pràctics. No patiu: si teniu un diamant no es convertirà en grafit en molt temps!

Les capes del grafit poden lliscar entre elles, deixant empremtes al paper. Fins-i-tot no és difícil desplaçar els electrons que fan les unions verticals. D'aquí el caràcter conductor del grafit.

Al grafit els àtoms de carboni presenten tres enllaços covalents en el pla *xy* amb un angle de 120° i una distància de 0,142 nm entre ells. La distància entre capes en la direcció *z* és de 0,342 nm, i les forces de cohesió, de tipus Van der Vaals, són molt més febles. Tot això fa que el grafit presenti unes propietats clarament anisòtropes. Elèctricament, per exemple, en les direccions *xy* es comporta gairebé com un metall, mentre que en la direcció *z* ho fa com un semiconductor.

Si aquesta riquesa de diversitat de propietats us sorprèn, espereu a veure altres formes al·lotròpiques del carboni descobertes als darrers anys, com ara el grafè, els nanotubs de carboni o els ful·lerens, que veurem més endavant.

Estructura de bandes

Hem parlat de semiconductors i metalls. Que hi ha darrera d'aquests conceptes?

El model atòmic estableix un conjunt de valors discrets per l'energia dels electrons d'un àtom. Però, que passa quan tenim de l'ordre de 10^{23} àtoms iguals junts? A conseqüència del principi d'exclusió de Pauli, aquests valors energètics fan un *splitting*, es divideixen en milions de nivells d'energia diferents molt propers. Tant, que la línia que representa el nivell d'energia es converteix en una banda. El salt entre dos bandes s'anomena *gap*.

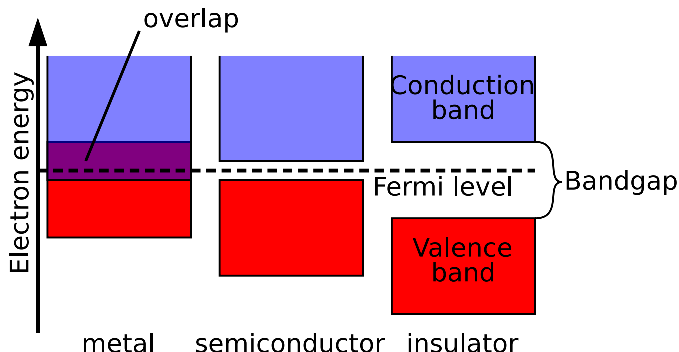


Figura 22: ***Estructura de bandes per a un metall, un semiconductor i un aïllant. En vermell les bandes de valència, en violat les bandes de conducció.*** *Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2209723*

A 0 K tots els electrons ocupen nivells d'energia inferior al nivell de Fermi. Segons on queda aquest nivell de Fermi respecte a les bandes d'energia i els seus gaps ens trobem amb diferents casos:

- Si el nivell de Fermi es troba en mig de les bandes d'energia ens trobem amb un metall, ja que els electrons poden fàcilment rebre energia.

- Si el nivell de Fermi es troba al mig d'un *gap* petit, l'energia tèrmica (mai som a 0 K) permet que electrons de la banda de valència (en color vermell) passin a la banda de conducció (en color violat), deixant un forat a la banda de valència. El forat es comporta com una carrega positiva. Ens trobem amb un semiconductor: a mes temperatura, més electrons passen a la banda de conducció i més forats es produeixen a la banda de valència. Amb l'increment de càrregues lliures d'agafar energia millora la conductivitat elèctrica. Just al contrari que en el metall. Als metalls conforme més electrons agafen energia menys nivells lliures tenim per agafar-ne de nova i la banda es satura, presentant un descens de la conductivitat amb la temperatura. L'energia de la llum produeix el mateix efecte de creació de parells electró-forat al semiconductor, essent la base de les cèl·lules fotovoltaiques.

- Si el nivell de Fermi es troba al mig d'un *gap* important entre les bandes de valència i conducció ens trobem amb un aïllant. L'energia tèrmica no és suficient er portar electrons de la banda de valència a la de conducció i no tenim càrregues que puguin agafar l'energia elèctrica disponible.

Cristalls iònics

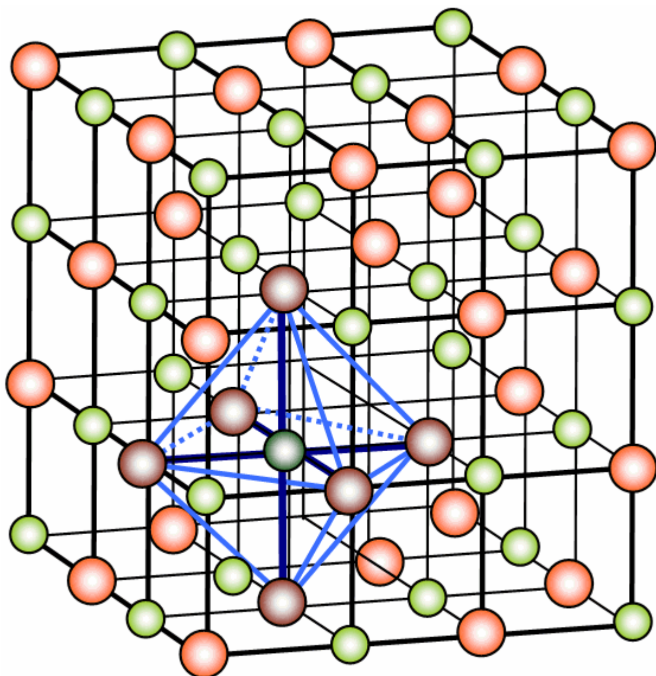


Figura 23: Cristall de NaCl. Font: By H. Hoffmeister, Lanzi, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=471512

A un cristall iònic tenim anions i cations a diferents posicions de la cel·la unitat. Per exemple, un cristall de NaCl el podem considerar com dues xarxes FCC, una amb ions Cl^- i la segona, desplaçada *a*/2, d'ions Na^+. Les forces de Coulomb entre els ions són de tal magnitud que el sòlid és molt dur. Però, a la vegada, és molt fràgil: és suficient un cop per desplaçar una capa sobre l'altre per un instant i, el que abans era atracció que donava cohesió a la xarxa esdevé repulsió que la fractura. Aquesta relació duresa/fragilitat serà una constant el l'estudi dels materials.

Aliatges

Un aliatge és una barreja homogènia de dos o més elements, dels quals com a mínim un ha de ser un metall. Aquest compost pot tenir propietats ben diferents dels elements constituents. De vegades només una petita proporció d'un dels components pot canviar molt les propietats de l'aliatge.

Alguns aliatges comuns[WP2020]:

Acers: Fe, C	Amalgames: Hg, M	Alnico: Co, Al, Ni
Acers inoxidables: Fe, Cr, Ni	Duralumini: Al, Cu, Mg, Mn, Si	Constantà: Cu, Ni
Llautó: Cu, Zn	Alpaca: Zn, Cu, Ni	Nitinol: Ni, Ti
Bronzes: Cu, M (Sn)	Nicrom: Ni, Cr	Zamak: Zn, Al, Mg, Cu

De fet utilitzem més els aliatges que els metalls purs. Rarament fem servir ferro dolç (ferro pur), únicament en nuclis d'electroimants; normalment fem servir acers i foses, que milloren les propietats mecàniques del ferro. Quan al taller soldem amb estany en realitat ho fem amb un aliatge amb aquest metall com a principal component, però amb altres metalls que baixen el seu punt de fusió (típicament es feia servir plom, amb una proporció 60% Sn / 40% Pb; avui en dia s'evita utilitzar el plom donada la seva toxicitat). La majoria d'objectes metàl·lics daurats que veiem estan fets amb llautó.

Tipus d'aliatges

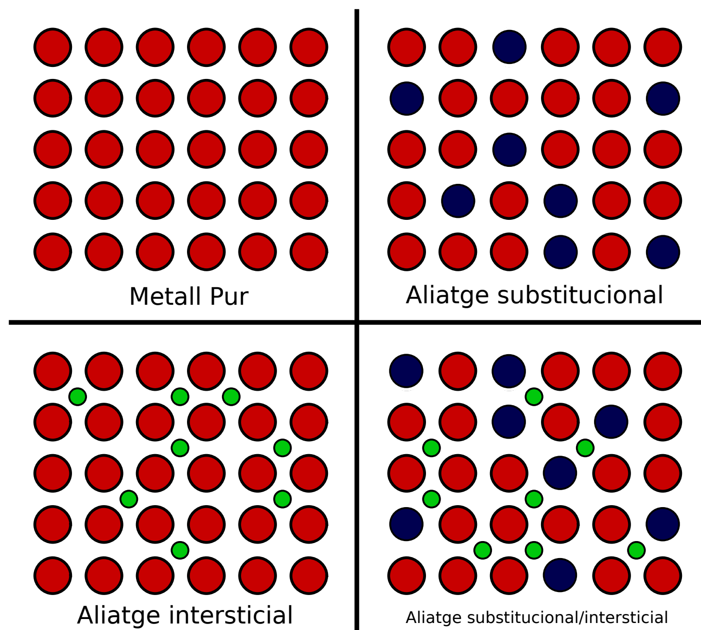


Figura 24: Tipus d'aliatges. Font: Jordi Orts https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=94778952

Els aliatges poden ser de tipus *substitucional:* alguns àtoms de la xarxa es substitueixen per àtoms d'altre element. És el cas del llautó, on alguns àtoms de Cu es substitueixen per Zn.

Una altra opció és encabir àtoms d'un altre element en els espais que deixen lliures els àtoms metàl·lics entre ells, són els aliatges *intersticials*. Un exemple és l'acer, on àtoms de C s'infiltren entre els àtom de Fe.

Podem tenir un aliatge mixt, com és el cas de l'acer inoxidable: àtoms de Ni i Cr substituint Fe amb àtoms de C infiltrats.

Diagrama de fases

La millor forma de representar un aliatge és amb un gràfic amb el percentatge d'un dels constituents al eix *x* i la temperatura al eix *y*. Aquest gràfic s'anomena *diagrama de fases*.

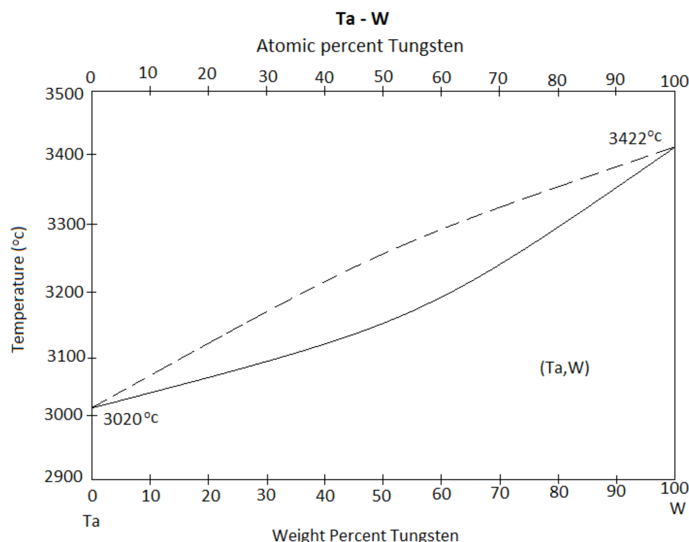


*Figura 25: **Diagrama de fases Ta-W**. Font: Materialspedia CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37190392*

Fixeu-vos en el diagrama de fases Ta-W. A l'eix *x* hem representat el % de W: a l'esquerra tenim Ta pur, a la dreta W pur. Únicament en aquests extrem tenim una temperatura de fusió constant, característica de les substàncies pures. Al mig tenim una zona, entre la línia contínua (per sota d'ella tenim sòlid) i la discontínua (per sobre d'ella tenim líquid) en que coexisteixen es fases sòlida i líquida.

Aquesta coexistència de fases la trobarem freqüentment als aliatges.

Punt eutèctic

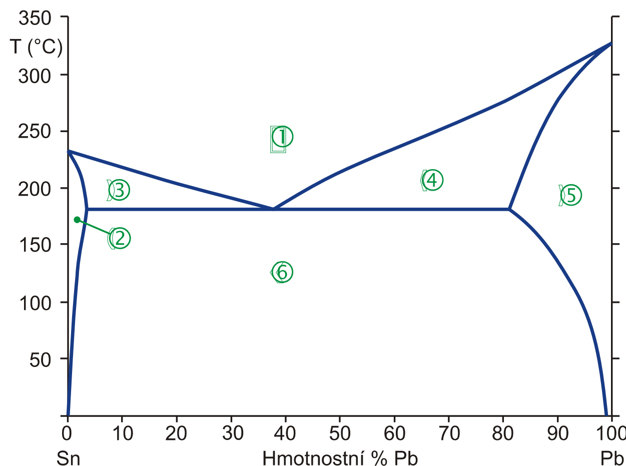


Figura 26: ***Diagrama de fases Sn-Pb. La zona 1 només conté líquid, la 2 sòlid α, la 3 sòlid α i líquid, la 4 sòlid β, la 5 sòlid β i la 6 sòlid α i β***
Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1952383

En alguns aliatges trobem un comportament peculiar al diagrama de fases: per a una certa composició (anomenada *composició eutèctica*) el canvi de sòlid a líquid es realitza a temperatura constant (anomenada *temperatura eutèctica*), com si es tractés d'una substància pura. Fixeu-vos en el cas del Sn-Pb: té un punt eutèctic amb un 61,9 % de Sn i 183 °C, temperatura per sota dels 232 °C a que fon el Sn pur i els 327 °C del Pb pur. Per això s'utilitza o utilitzava estany amb una composició Sn 60 % / Pb 40 % per soldar al taller.

Fixeu-vos com en aquest cas com domina l'estructura de xarxa de l'estany quan tenim poc plom (zona 2) i com domina l'estructura de xarxa del plom quan tenim poc estany (zona 5). Per altres concentracions tenim una barreja d'ambdues xarxes (zona 6).

Diagrama de fases Fe-C

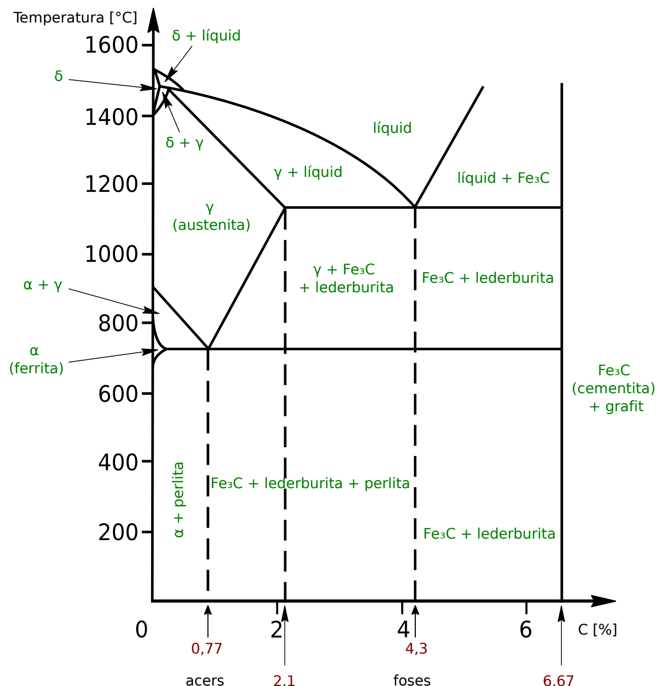


*Figura 27: **Diagrama de fases Fe-C**. Font: Jordi Orts CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29938585*

Com l'aliatge Fe-C és de tipus intersticial, només arriba al 6.67 % de C, que representa que el C ha omplert tots els forats existents a la xarxa de Fe.

Fixeu-vos quin diagrama més ric: per sota del 2,1 % de C tenim els acers, per sobre les foses. Apareix un punt eutèctic amb un 4,3 % de C, i un punt eutectoide amb el 0,77 %. L'anomenem punt *eutectoide* perquè no hi ha un canvio d'estat, l'austenita també és un sòlid. Justament l'existència de l'austenita diferencia als acers de les foses: si l'acer el tenim en fase austenita i el refredem ràpidament podrem congelar aquesta estructura de xarxa a temperatura ambient (*martensita*). Això no ho podem fer amb les foses.

Els llautons

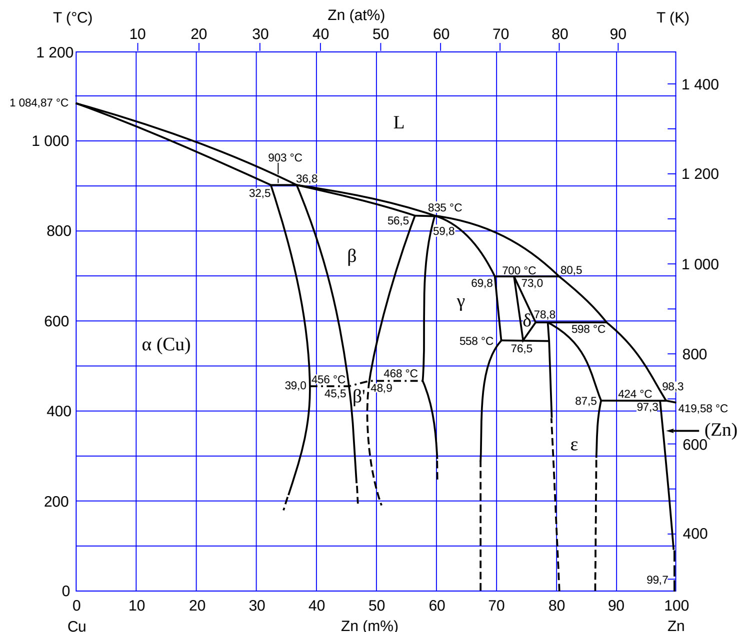


Figura 28: ***Diagrama de fases Cu-Zn****. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7876792*

Com veieu els llautons també presenten una gran riquesa de fases (en té 6), que es manifesta en la complexitat del seu diagrama. El Cu és mal·leable i dúctil. El Zn és dur i té una gran resistència metàl·lica. Quan els barregem obtenim diferents comportaments:

- Amb un 75-85% de Cu l’aliatge és vermellós/daurat i mal·leable
- Amb un 60-70% de Cu el llautó és groc i mal·leable
- Per sota del 50% de Cu l’aliatge és blanc, no mal·leable i trencadís.

Sòlids amorfs

Els sòlids amorfs no tenen estructura cristal·lina. Un exemple n'és el vidre.

Tenen un ordre a curt abast: fixeu-vos en la figura com els triangles centrats en àtoms Si o els centrats amb àtoms O es repeteixen en tota l'estructura. Però no tenen ordre de llarg abast: no són cristalls.

Aquesta manca d'ordenació els dona unes propietats electròniques i òptiques molt diverses, i diferents del mateix compost en forma cristal·lina. El vidre és transparent, la sorra no.

Una altra conseqüència es que no tenen un punt de fusió definit, sinó un interval de temperatures.

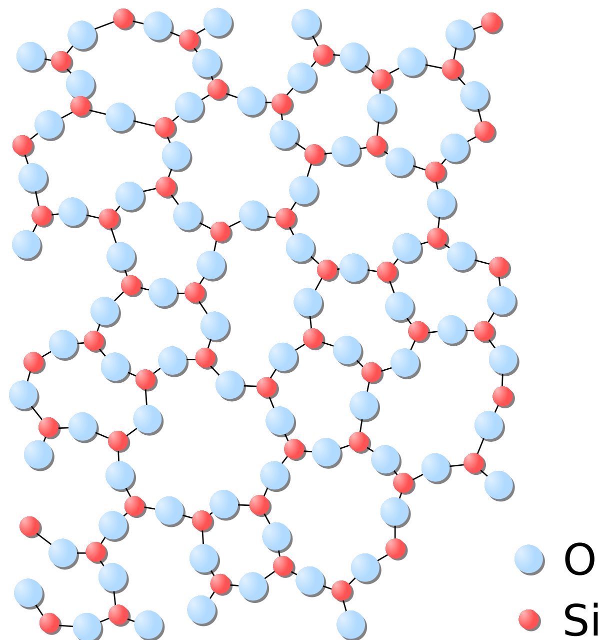


Figura 29: Estructura amorfa del vidre. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4104670

Quan escalfem el vidre, disminueix la seva viscositat (recordem que podem considerar que un amorf és un líquid extremadament viscós), s'estova i el podem deformar fàcilment, de forma que el podem conformar, fins-i-tot per bufat.

Com les nanoestructures del vidre s’orienten a l’atzar, aquest material presenta propietats isòtropes.

Especialment interessants són els metalls amorfs, també anomenats *vidres metàl·lics*. Com no tenen estructura de bandes, no són bons conductors de l’electricitat, malgrat els seus àtoms metàl·lics. Això és especialment interessant si presenten propietats ferromagnètiques, ja que permeten crear circuits magnètics absents de pèrdues per corrents de Foucault.

Freqüentment els plàstics presenten una estructura amorfa, així com gels, capes primes i d’altres materials amb nanoestructures com el vidre.

A la temperatura de transició vítria (T_g) els materials vítrics presenten una transició on comencen a estovar-se, disminuint la seva densitat, duresa i rigidesa.

Polímers

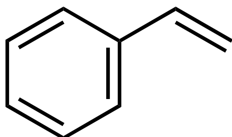


Figura 30: ***L'estirè (C_8H_8) és un monòmer derivat del benzè.*** *Font: https://ca.wikipedia.org/wiki/Estir%C3%A8#/media/Fitxer:Styrene_acsv.svg*

Els polímers són macromolècules formades per la unió de molècules més petites anomenades monòmers. Molts polímers són de tipus orgànic.

Aquestes unions poden presentar diferents estructures: lineal, ramificada, semi-cristal·lina, encreuada ...

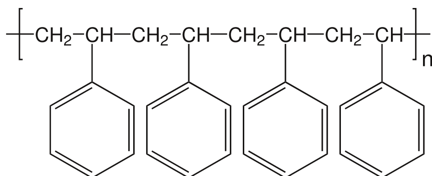


Figura 31: ***El poliestirè és un polímer format a partir de repetiticions del monòmer estirè.*** *Font: https://ca.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADmer#/media/Fitxer:Polystyrene_linear.svg*

Els polímers poden ser naturals (com les proteïnes, la cel·lulosa, el cautxú natural), semisintètics (nitrocel·lulosa, cautxú vulcanitzat) o sintètics (niló, poliestirè, PVC, polietilè). Els polímers es fabriquen per *policondensació* (quan es generen subproductes) o *poliaddició*.

Els plàstics són polímers als que s'afegeixen additius: colorants, plastificants, reticulants, antiestàtics, retardants de flama ... Tenen una energia d'enllaç baixa (T_f baix, E baix , ε alt), i baixa densitat.

Termoplàstics, termoestables i elastòmers

Segons l'estructura d'aquestes cadenes de polímers trobarem *termoplàstics* (lineals o ramificats, sense entrecreuaments), *termoestables* (amb un grau alt d'entrecreuament) i *elastòmers* (amb un grau baix d'entrecreuament).

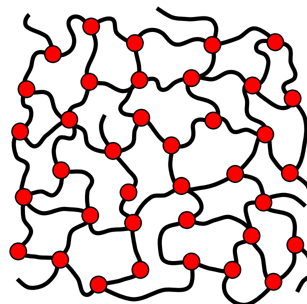


Figura 34: ***Polímer amb un alt grau d'entrecreuament (termoestable).*** *Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer#/media/File:Polymerstruktur-engmaschig_vernetzt.svg*

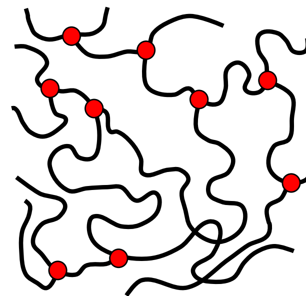


*Figura 35: P**olímer amb un lleuger grau d'entrecreuament (elastòmer)**. Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer#/media/File:Polymerstruktur-weitmaschig_vernetzt.svg*

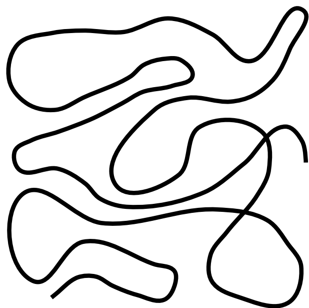


Figura 32: ***Polímer lineal (termoplàstic).*** *Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer#/media/File:Polymerstruktur-linear.svg*

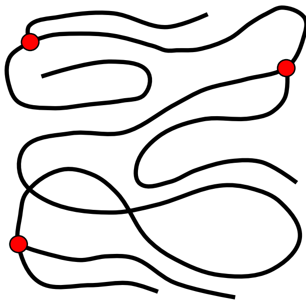


Figura 33: ***Polímer ramificat (termoplàstic)***. *Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer#/media/File:Polymerstruktur-verzweigt.svg*

Els termoplàstics es poden conformar (i reciclar) amb calor, ja que les cadenes poden lliscar entre elles en pujar la temperatura.. En canvi els termoestables resisteixen millor temperatures altes, però s'han de conformar a la fabricació.

Cristalls líquids

Les molècules d’aquests materials són molt anisòtropes. Tenen forma de bastons, discs, per la qual cosa les propietats són diferents segons l’orientació de les molècules. Aquestes orientacions reben el nom de *mesofases*: nemàtica, esmèctica, twist ...

Cristallin	Colonnaire	Smectique			Nématique		Isotrope
C	Col	S_B	S_C	S_A	N_D	N	I
ordre	ordre d’orientation et de position				ordre d’orientation		désordre
	molécules plutôt symétriques avec 2 chaînes grasses				molécules discotiques	NC– –CN Ex : cyanobiphényls	

Figura 36: Mesofases dels cristalls líquids. Font: By Mforesto CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6836851

Una de les aplicacions més conegudes són els displays LCD. Com l’eix òptic depèn de l’orientació de les molècules (3) i aquest el podem canviar -transició de Fréedericksz- mitjançant un camp elèctric (2,4) , podem mostrar un contrast llum/foscor polaritzant la llum (1,5) que travessa el cristall líquid i es reflecteix (6) al fons. Si el cristall no pot respondre al pla de la llum tindrem foscor.

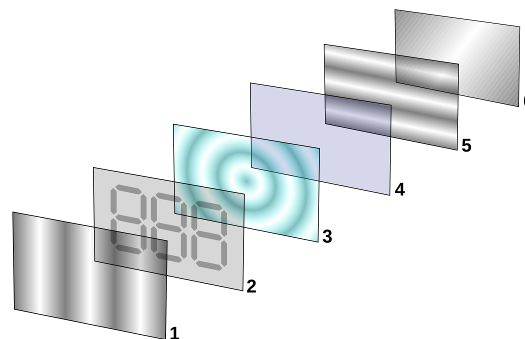


Figura 37: Capes d'un display LCD. Font: By Ed g2s. CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=606988

Nanotecnologia

Aquest camp neix amb el títol d’una conferència[FE1959] de Richard Feynman *There's Plenty of Room at the Bottom* el 29/12/1959. La qüestió és controlar i manipular la matèria en el rang dels 1-100 nm. Als darrers anys els nanotubs de carboni, el grafè i els ful·lerens han donat una nova empenta a aquest camp. Les aplicacions d’aquestes noves formes al·lotròpiques del carboni són increïbles, com ara els supercondensadors o la medicina. Fa pocs anys que els ful·lerens s’utilitzen com a portador d’antibiòtics o en la lluita contra el càncer. Els nanotubs de carboni es fan servir per manillars de bicicletes o fletxes.

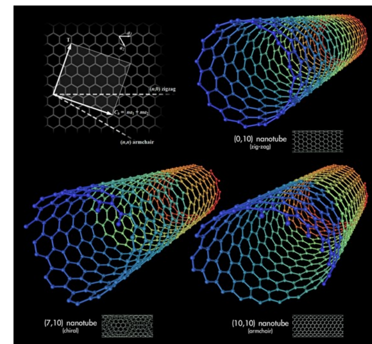


Figura 38: Nanotubs de carboni. Font: By Michael Ströck, Ma Baker, Lucasbfr CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=847494

El grafè és un material molt lleuger, dur, rígid i resistent, insuperable conductor elèctric i tèrmic. Recentment s’ha descobert la superconductivitat del grafè amb capes rotades un angle màgic de 1,1°. Les perspectives d’aplicació en el camp de la fusió nuclear, les cèl·lules fotovoltaiques, els transistors i pantalles són prometedores.

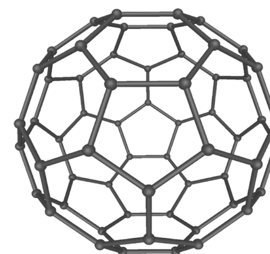


Figura 39: Ful·leré C60. Font: By Mstroeck, Bryn C CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2441459

. Propietats dels materials

Actualment els enginyers treballen amb milers de materials diferents en els seus dissenys. Cal seleccionar els materials dintre d'aquesta gran diversitat segons les seves propietats, que poden ser molt diverses i claus segons la funció de cada peça: densitat, resistència mecànica, conductibilitat elèctrica i tèrmica, color, interacció amb camps magnètics, resistència a la corrosió ...

Assajos mecànics

És molt interessant conèixer el comportament d'un material quan li apliquem un esforç. Quan caracteritzem materials parlem d'esforços i no de forces perquè volem dades sobre el material, no sobre la peça en concret. Per exemple, dues peces del mateix material i diferent secció *s* es trencaran amb forces diferents aplicades, però para un mateix valor del quocient $\sigma \equiv \frac{F}{s}$. Aquest quocient s'anomena *esforç unitari* o *tensió*, i la seva unitat és el Pa. Quan la tensió es perpendicular a la superfície parlem de *tensió normal*, si és paral·lela a ella parlem de *tensió tangencial*.

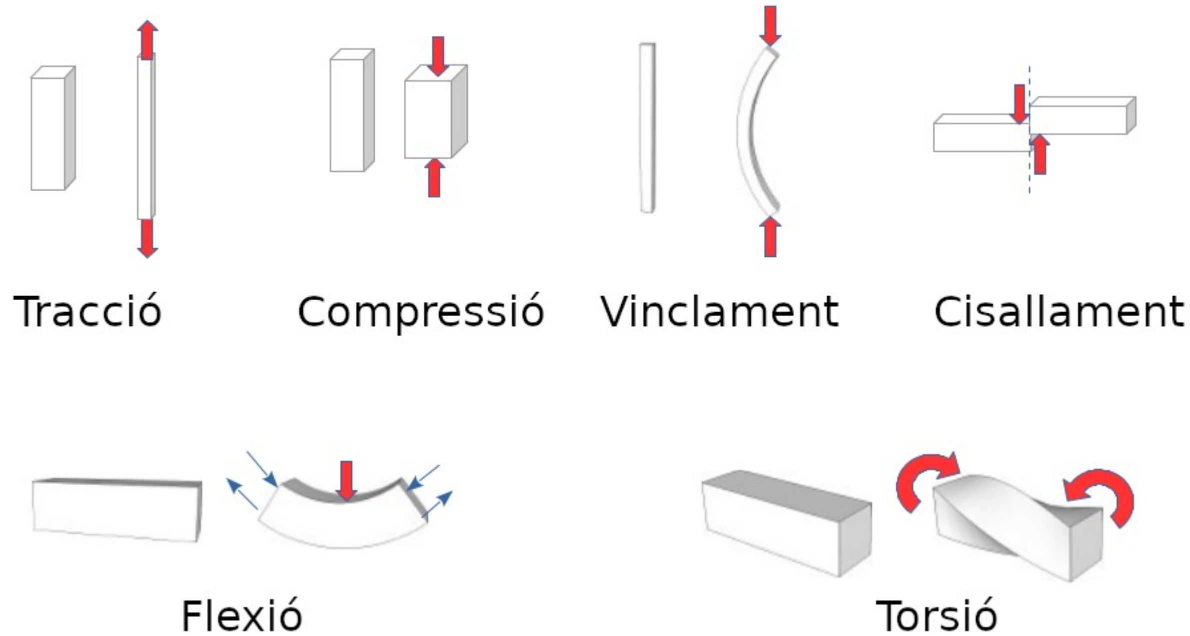


*Figura 40: **Diferents tipus d'esforços**. Font: R Cussó et al. CC-BY-NC-SA-4.0. Forces i estructures. Apliquem la tecnologia 3r d'ESO. https://alexandria.xtec.cat/course/view.php?id=798*

Pel mateix motiu ens interessaran les deformacions relatives, que depenen del material, no les absolutes, que depenen de la peça en concret. En el cas d'un esforç de tracció, per exemple, en interessarà el quocient $\varepsilon \equiv \frac{\Delta L}{L_0}$, anomenat allargament unitari, que s'acostuma a donar en %.

Aquestes deformacions poden ser *elàstiques* (la deformació desapareix quan es deixa d'aplicar l'esforç) o *plàstiques* (la deformació es manté de forma permanent quan deixem d'aplicar l'esforç).

Assaig de tracció

Aquest assaig consisteix en sotmetre una proveta normalitzada a un esforç axial creixent fins el seu trencament. L'àrea sota aquesta corba mesura la *tenacitat* del material.

Típicament s'observa una zona elàstica per a petits esforços $\sigma < \sigma_e$ (*límit elàstic*) on es compleix la llei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

on *E* és el *mòdul elàstic* o *mòdul de Young*, del qual podem fer una estimació experimental amb $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$.

Després de la zona elàstica apareix la zona plàstica, amb un valor màxim de l'esforç (1) que s'anomena *resistència a la tracció* (R_m).

Si continuem aplicant esforç la mostra arriba al punt de fractura (4). L'allargament corresponent (caldrà restar la part elàstica amb una paral·lela a la línia elàstica) ens dona una mesura de la ductilitat del material.

Com experimentalment potser difícil determinar el limit elàstic (3), per conveni[SH98] s'agafa com a límit elàstic experimental (2) el punt de tall de la corba amb una paral·lela a la línia elàstica amb una deformació del 0,2 % (5).

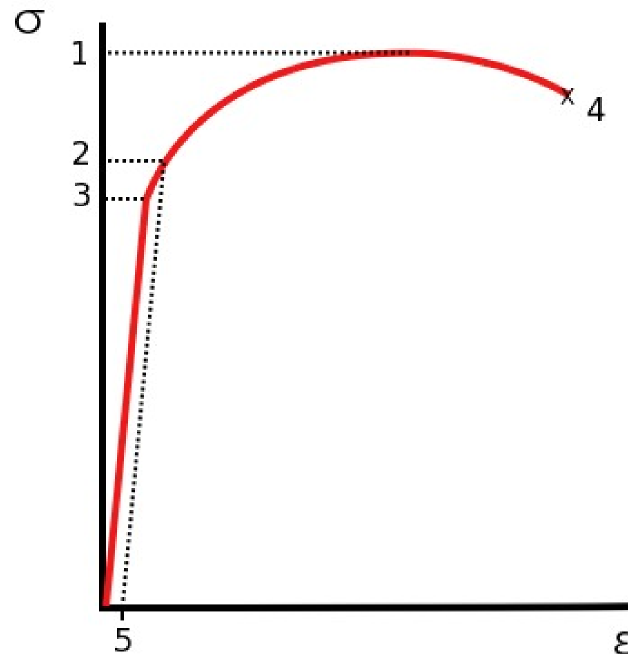


*Figura 41: **Diagrama de tracció**. Font: CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=647577*

Típicament els valors de σ són de l'ordre del MPa (N/mm²) mentre que les valor del mòdul de Young acostumen a ser de l'ordre del GPa .

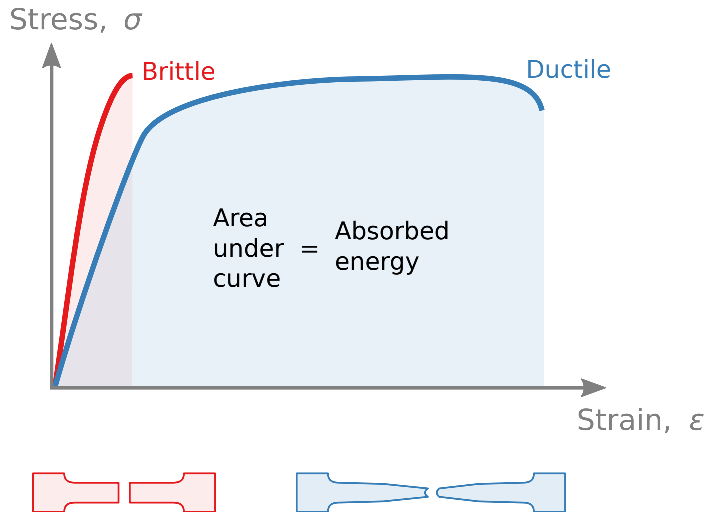


Figura 42: ***Comparació dels diagrames de tracció de materials fràgils (Brittle) i dúctils****. Font: By Nicoguaro CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89893260*

Els diagrames de tracció dels materials fràgils i dúctils són molt diferents, com podeu observar a la figura.

En els materials fràgils la zona plàstica és en la pràctica inexistent. No podrem aconseguir un allargament permanent sense trencar-los.

En canvi els materials dúctils presenten una amplia zona plàstica que ens permet deformar-los sense que es trenquin, augmentant sensiblement el seu allargament permanent.

Assaig d'impacte

En el cas de l'assaig de tracció hem vist com reacciona el material a esforços progressius. Si volem saber com es comporta en front d'esforços aplicats de forma molt ràpida ens caldrà un assaig d'impacte, com es el cas del pèndul de Charpy.

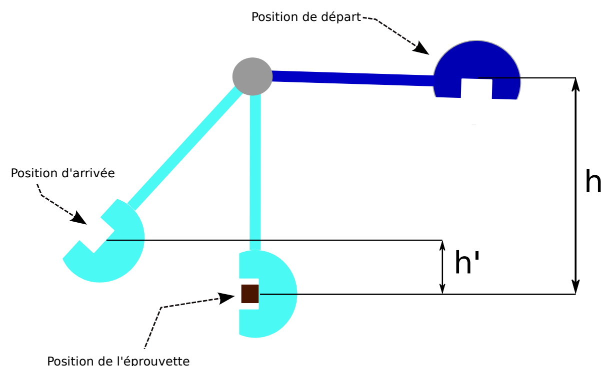


*Figura 43: **Assaig de Charpy**. Font: By Romary CC BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=556292*

A l'assaig de Charpy la proveta amb una secció i enclusa en forma de V determinades es col·loca a la part inferior de la trajectòria d'un pèndul, interceptant un martell. La diferència entre l'energia potencial inicial del martell i la final serà la consumida en el trencament de la proveta.

Podem mesurar la *resiliència* del material com el quocient d'aquesta diferència d'energia entre la secció de la proveta a la zona de l'entalla (J/mm^2).

Assaig de duresa

Si bé a mineralogia s'utilitza l'escala de Mohs, basada en la comparació amb 10 minerals arbitraris, els assajos tecnològics de duresa utilitzen diversos tipus de penetradors que difereixen en forma, material i mides, amb el que s'exerceixen forces sobre la mostra i es mesura l'empremta que hi deixa. Podeu tenir una idea d'aquesta diversitat a la següent taula[AS01] d'assaigs típics:

Assaig	Penetrador	Càrrega	Aplicació
Brinell	Bola de 10 mm	3 000 kg	Ferro i acers fosos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aliatges no fèrrics
Rockwell A	Con de diamant	60 kg	Materials molt durs
Rockwell B	Bola de 1/16 polzades	100 kg	Llautó, acer de baixa resistència
Rockwell C	Con de diamant	150 kg	Acer d'alta resistència
Rockwell D	Con de diamant	100 kg	Acer d'alta resistència
Rockwell E	Bola de 1/8 polzades	100 kg	Materials molt tous
Rockwell F	Bola de 1/16 polzades	60 kg	Alumini, materials tous
Vickers	Piràmide de diamant	10 kg	Materials durs
Knoop	Piràmide de diamant	500 g	Tots els materials

A l'assaig de duresa Brinell s'utilitza una bola de diàmetre *D* (mm) d'acer trempat (HBS) per a materials tous amb la que s'aplica una força *F* (N), i de carbur de tungstè (HBW) per a materials durs. Es mesura el diàmetre *d* (mm) de l'empremta deixat i el valor de la duresa bé donat:

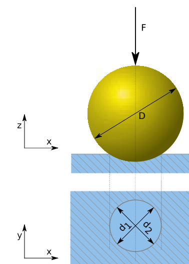


Figura 44: ***Assaig de duresa Brinell****. Font: By Lokilech, Nerdture CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6547875*

$$HB = 0{,}102 \cdot \frac{2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

A l'assaig de duresa Vickers el penetrador és una piràmide de diamant amb un angle base de 136º. Es mesura la diagonal de l'empremta *d (mm)* i i el valor de la duresa bé donat per:

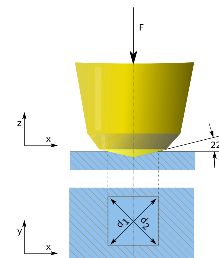


Figura 45: ***Assaig de Vickers****. Font: By A1, Nerdture CC BY-SA https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6531452*

$$HV \simeq 0{,}1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

L'assaig Rockwell és el mètode més utilitzat, ja que és molt pràctic. Una màquina, que pot variar la força aplicada i canviar de penetrador, mostra en pantalla automàticament la duresa del material en mesurar l'increment de la fondària de l'empremta a la mostra.

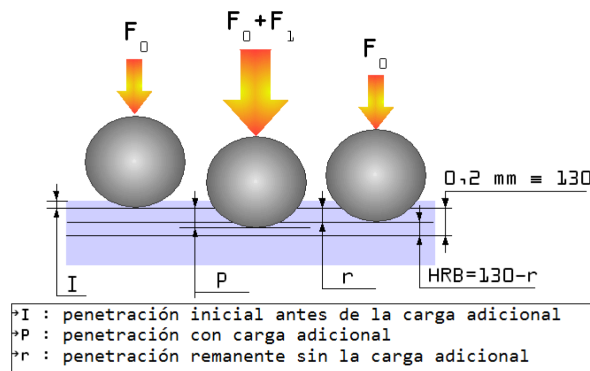


*Figura 46: **Assaig Rockwell.** Font: :Bloody_Guardian CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41096936*



*Figura 47: **duròmetre Rockwell**. Font: Frobles, CC BY-SA 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2486134*

La màquina inicialment aplica una força petita, per eliminar la part elàstica, i registra el desplaçament en fondària *r* en aplicar una segona força superior. El valor de la duresa és:

$$HR = N - \frac{r}{s}$$

on *N* i *s* son paràmetres que depenen de l'escala Rockwell utilitzada (HRA, HRB ...)

Assaig de fatiga

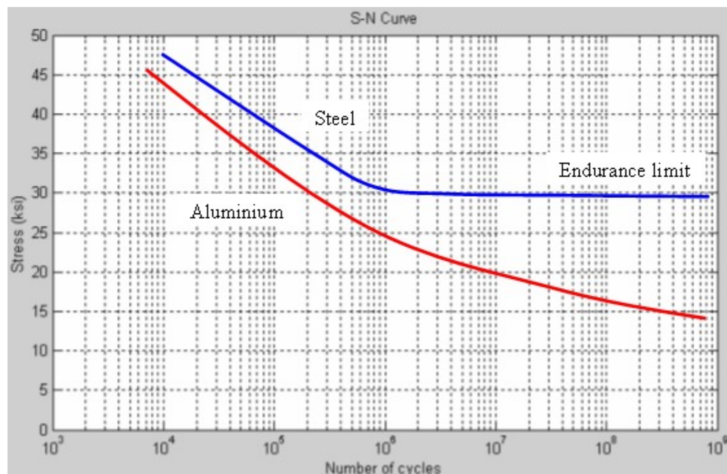


Figura 48: ***Corbes S-N per acer i alumini****. Font: By AndrewDressel CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6319461*

Quan apliquem un esforç a un material de forma cíclica moltes vegades aquest poc trencar-se, fins i tot amb esforços petits, com podem observar a la figura. Aquesta gràfica, anomenada *corba de Wöhler* o *corba S-N*, mostra la intensitat de l'esforç necessari en front del nombre de cicles (en escala logarítmica) per trencar el material. Així com per l'alumini trobarem un nombre de cicles suficient (*vida a fatiga*) per a qualsevol esforç, per petit que sigui, en el cas de l'acer trobem un *límit de fatiga*: esforços per sota d'aquest valor mai trencaran el metall.

Propietats tèrmiques

Calor latent. Calor específica.

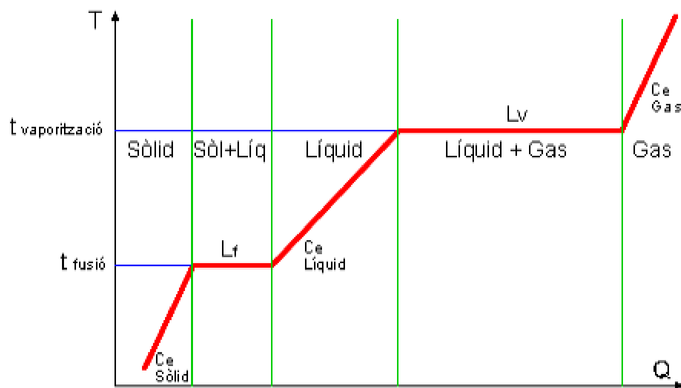


*Figura 49: **Gràfic T(Q) substància pura**. Font: Conceptes de termodinàmica. Tecnologia industrial (autoformació IOC). https://educaciodigital.cat/ioc-batx/moodle/mod/book/view.php?id=596&chapterid=336*

Si escalfem una substància pura podem observar un gràfic com el de la figura. Dintre d'un mateix estat observem que

$$Q = m \cdot c_e \cdot \Delta T$$

on c_e és la calor específica, que correspon a la pendent d'escalfament.

Quan la substància canvia d'estat veiem que

$$Q = m \cdot L_i$$

on L_i és el calor latent de fusió (L_f) o de vaporització (L_v), segons el canvi d'estat.

Conductibilitat tèrmica

El flux de calor a través d'una placa de superfície *S* i gruix *e* depèn de la diferència de temperatures entre els costats de la placa i del material d'aquesta segons la llei de Fourier:

$$\dot{Q}=\lambda\cdot\frac{S}{e}\cdot\Delta T$$

on λ és la *conductibilitat tèrmica* del material.

Cal destacar que les interfícies sòlid/gas tenen resistències tèrmiques molt elevades. El poliestirè té $\lambda = 0{,}13\ W\ m^{-1}\ °C^{-1}$, però el poliestirè expandit té $\lambda = 0{,}037\ W\ m^{-1}\ °C^{-1}$.

A la pràctica es fa una analogia amb la llei d'Ohm per fer càlculs d'aïllament tèrmic amb diferents superfícies, materials i gruixos. ΔT seria l'equivalent a la tensió, $\left(\lambda\cdot\frac{S}{e}\right)^{-1}$ a la resistència i $\dot{Q}$ a la intensitat. D'aquesta manera podem utilitzar les mateixes expressions d'associacions de resistències (sèrie, paral·lel, mixt) en aquestes càlculs.

Dilatació tèrmica

Els cossos s'expandeixen amb la calor. Un bon exemple el trobem a les vies del ferrocarril, on els raïls són molt llargs i si no es prenen precaucions poden deformar-se a l'estiu, provocant accidents.

Altres exemples de situacions en que cal tenir en compte les dilatacions en el disseny són les cobertes de terrats, els ponts i altres edificis i construccions llargs que pateixen canvis de temperatura entre hivern i estiu.



Figura 50: ***Efectes de la dilatació tèrmica a les vies de ferrocarril****. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1534947*

Si treballem amb una dimensió veurem que una longitud L_0 experimenta un increment proporcional a L_0 i a l'increment de temperatura i que depèn del material:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

on α és el *coeficient de dilatació lineal* del material. La nova longitud serà $L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

Per a superfícies:

$S = S_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T)$ amb β = 2 · α

i per a volums:

$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta T)$ amb γ= 3 · α

Per evitar aquestes deformacions i trencaments abans senyalats s'utilitzen juntes de dilatació com la de la imatge, que permeten dilatacions i eviten aquests problemes.



Figura 51: ***Junta de dilatació d'un pont*** *. Font: Magninhugo CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8713319*

Per altre banda la dilatació és el principi de funcionament dels termòmetres de mercuri o dels termòstats, controls intermitents i vàlvules basades en bimetalls.

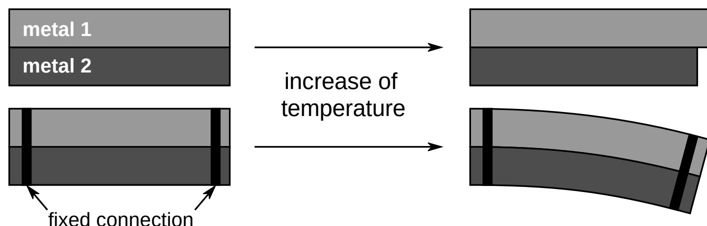


*Figura 52: **Principi de la curvatura d'un bimetall**. Font: By Patrick87, Virtual gamma CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25482530*

Un bimetall és una peça composta per dos làmines de metalls diferents unides. Com els dois metalls tenen diferent coeficient de dilatació la peça es corba amb l'increment de temperatura. Si aquesta curvatura provoca l'obertura d'un circuit elèctric (com la peça és metàl·lica és conductora) tindrem un termòstat, com els utilitzats a planxes i estufes elèctriques.



*Figura 53: **Termòstat de planxa elèctrica**. Font: Aliexpress*



*Figura 54: **Relé tèrmic**. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3408910*

Els relés tèrmics, sistemes de protecció contra sobrecàrregues febles i perllongades pels motors elèctrics, també utilitzen bimetalls en el seu funcionament.

Propietats elèctriques

Resistivitat

La resistència d'un conductor depèn de la longitud *l* d'aquest, de la seva secció *s* i del material:

$$R=\rho\cdot\frac{l}{s}$$

on *ρ* és la resistivitat del material.

Aquesta resistivitat no ñes constant: depèn de la temperatura:

$$\rho=\rho(T)=\rho_0+c1\cdot\Delta T+...\simeq\rho_0\cdot(1+\alpha\cdot\Delta T)$$

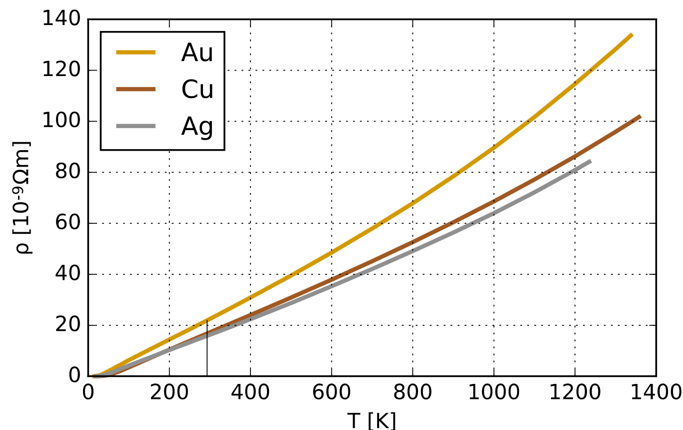


Figura 55: ***Dependència amb la temperatura de la resistivitat de l'or, coure i plata***. *Font: By Geek3 CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74783698*

Per exemple, per al coure

$\rho(20\ °C) = 1{,}72\cdot10^{-8}\ \Omega\cdot m$ $\alpha = 0{,}0039\ K^{-1}$

Superconductivitat

Aquest fenomen quàntic apareix per a certs materials quan els refredem per sota d'una temperatura crítica T_c. Es produeix una transició de fase i la resistivitat senzillament desapareix.

No es fàcil explicar l'aparició d'aquest fenomen. Diverses teories expliquen alguns dels tipus de superconductivitat observats, com la teoria BCS, però l'aparició de superconductors d'alta temperatura al 1987 (temperatures que es poden aconseguir amb nitrogen líquid, anteriorment els materials trobats tenien temperatures per sota de 40 K) encara no tenen explicació.

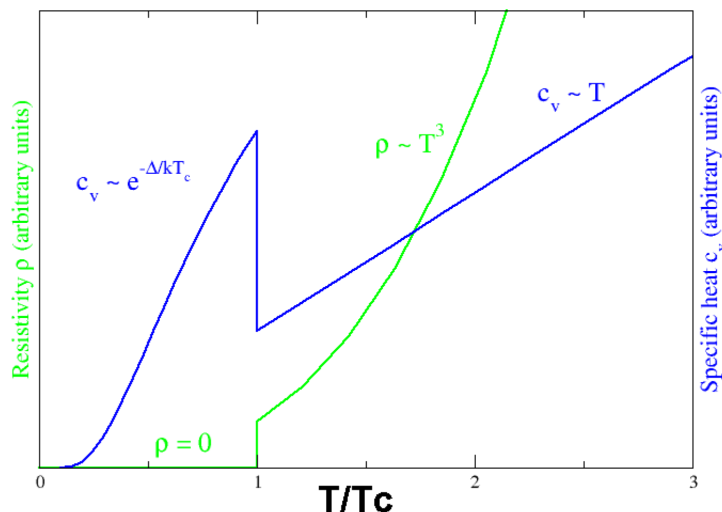


Figura 56: ***Comportament de la calor específica i de la resistivitat a una transició de fase superconductora****. Font: CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=485071*

La recerca en aquest materials és clau: sense resistivitat es poden aconseguir electroimants potents, amb aplicació a la medicina, transport, reactors de fusió nuclear...

Piezoelectricitat

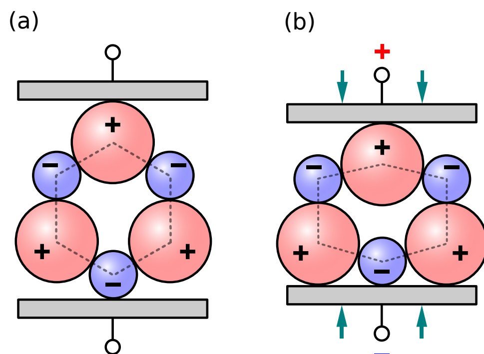


*Figura 57: **Piezoelèctric: la pressió exercida crea un dipol que genera una tensió als electrodes**. Font: By MikeRun CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=87621030*

Aquest efecte apareix en alguns materials que, en exercir pressió sobre ell, generen una diferència de potencial. Aquesta pot ser petita, com succeeix als micròfons dels mòbils i ordinador, o molt gran, com les tensions responsables de les guspires als encenedors piezoelèctrics.

També podem trobar l'efecte invers: aplicant una tensió sobre el material aquest es deforma. És el cas dels brunzidors piezoelèctrics i d'alguns actuadors, com els utilitzats als microscopis d'efecte tunel.



Figura 58: Brunzidor piezoelèctric. Font: By Gophi, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2454869



Figura 59: Encenedor piezoelèctric. Font: By Lionel Allorge CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20782318

Piroelectricitat

Quan cares oposades d'alguns cristalls asimètrics s'exposen a la calor en forma de radiació infraroja, generen una petita càrrega elèctrica que es mesurable.

D'aquesta forma podem mesurar la temperatura d'un cos per la radiació infraroja que emet, sense contacte, a distància. Especialment útil per mesurar temperatures de forns o de persones en temps de pandèmia o per detectar la presència de persones en sistemes d'alarmes o automatització de llums de passadissos i serveis (sensors PIR).

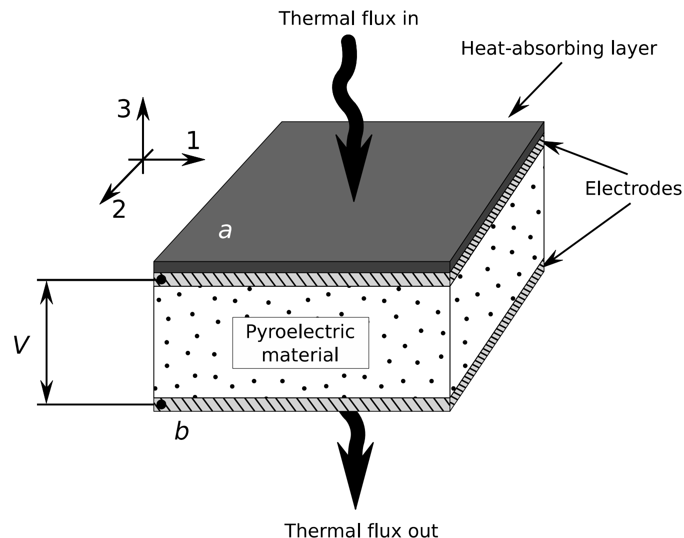


Figura 60: Sensor piroelèctric. Font: By EBatlleP CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=92765264

Efecte Seebeck

Aquest fenomen consisteix en la generació d'una diferència de potencial per efecte d'un gradient tèrmic. Aquest efecte es pot utilitzar per mesurar temperatures o per produir electricitat.

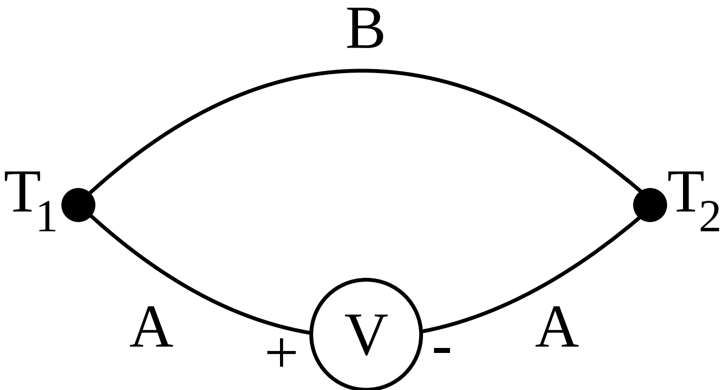


*Figura 61: **Efecte Seebeck**. Font: By Omegatron, Malyszkz CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11089359*

Un termoparell està constituït per dos fils de metalls diferents (A, B) soldats entre sí. Cada unió es col·loca a temperatura diferent (T_1, T_2) i es mesura la diferència de potencial generada, que es proporcional a la diferència de les dues temperatures:

$$U = (S_A - S_B) \cdot \Delta T$$

Tipus	Materials	S_A-S_B (µV/°C)
J	Fe-Constantà	50
K	Cromel-Alumel	41
N	Nicrosil-Nisil	39
E	Cromel-Constantà	68

Efecte Peltier

És l'efecte contrari al Seebeck: un corrent elèctric genera un flux de calor entre els termoparells, actuant com a bomba de calor:

$$\dot{Q} = p \cdot I$$

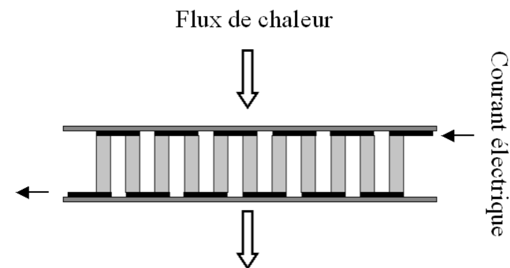


*Figura 62: **Mòdul Peltier**. By David Berardan, Bloody-libu CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20601374*

Si bé podríem fer servir els mateixos aliatges que hem vist a l'efecte Seebeck, s'han aconseguit elements Peltier molt eficients i econòmics utilitzant semiconductors de bismut telurat. Com el dopatge d'aquests semiconductors és fa malbé a la temperatura de fusió del Sn60Pb40 s'utilitza indi per soldar els elements, que té una temperatura de fusió més baixa.



*Figura 63: **Cèl·lula Peltier comercial**. Font: Aliexpress*

Aquests mòduls Peltier també són molt eficients amb l'efecte Seebeck, per la qual cosa també s'utilitzen com a termopiles.

Potencial de contacte

Quan dos metalls diferents es posen en contacte elèctric els electrons fluiran des del metall amb un nivell Fermi més alt fins al metall amb el nivell Fermi inferior, fins igualar els nivells. El fet que els nivells de Fermi siguin iguals, no vol dir que els potencials elèctrics siguin iguals. El potencial elèctric de cada material està controlat per la seva funció de treball Φ, de manera que els metalls diferents poden mostrar una diferència de potencial elèctric fins i tot en equilibri termodinàmic.

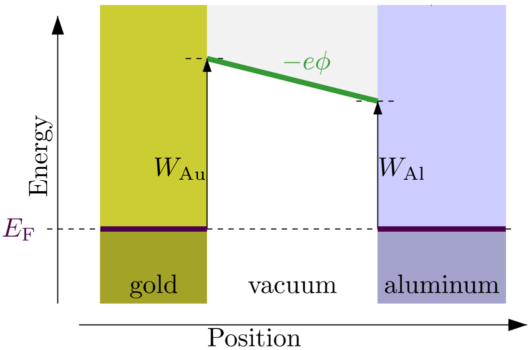


*Figura 64: **Potencial de contacte**. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26728247*

Aquest és el principi de funcionament de les piles. I per aquest motiu hem de vigilar quan posem en contacte dos metalls diferents, ja que poden generar problemes com la corrosió: monedes, pírcings, unions cargolades ...

Metall	Φ (eV)	Metall	Φ (eV)
Ag	4,7	K	2,1
Au	4,8	Mn	3,8
Ca	3,2	Na	2,3
Cu	4,1	Ni	5,2

Propietats magnètiques

Caracteritzem el grau de magnetització d'un material en resposta a un camp magnètic amb la ***permeabilitat magnètica*** *μ,* que és el quocient entre la *inducció magnètica B* i l'*excitació magnètica H*:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

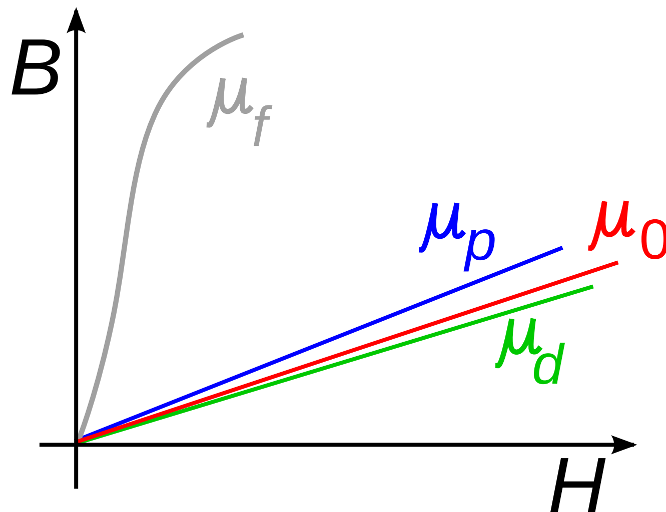


Figura 65: ***Permeabilitat magnètica****. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6577080*

Típicament trobarem tres comportaments amb relació a la permeabilitat magnètica del buit μ_0:

- Materials diamagnètics: $\mu_d \lesssim \mu_0$
- Materials paramagnètics $\mu_p \gtrsim \mu_0$
- Materials ferromagnètics $\mu_f \gg \mu_0$

La diferència a paramagnètics i diamagnètics es petita, però permet caracteritzar els materials.

També és interessant definir la ***permeabilitat relativa*** μ_r i la ***susceptibilitat magnètica*** χ

$$\mu_r \equiv \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\chi \equiv \mu_r - 1$$

Material	μ (H/m)	μ_r	Aplicacions
Ferrita U 60	$1{,}00\cdot10^{-5}$	8	Bobines UHF
Ferrita M33	$9{,}42\cdot10^{-4}$	750	Nuclis circuits RM
Niquel (99%)	$7{,}54\cdot10^{-4}$	600	
Ferrita N41	$3{,}77\cdot10^{-3}$	3000	Circuits potència
Ferro (99,8%)	$6{,}28\cdot10^{-3}$	5000	
Ferrita T38	$1{,}26\cdot10^{-2}$	10000	Transformadors
Acer Si GO	$5{,}03\cdot10^{-2}$	40000	Dinamos
supermalloy	1,26	1000000	Capçals enregistradors

Paramagnetisme

La majoria de materials que trobem a la natura són paramagnètics: Al, Ba, Ca, O, Pt, Na, Sr, U, Mg... La seva reacció en front del camp magnètic és molt feble. Es produeix per la tendència dels moments magnètics lliures del material a alinear-se paral·lelament al camp magnètic. Com a conseqüència aquests materials concentren les línies del camp magnètic.

Diamagnetisme

El diamagnetisme es el resultat de canvis en el moviment orbital dels electrons causats pel camp magnètic extern. El moment magnètic provocat és molt petit i de direcció oposada al camp aplicat.

Aquest tips de magnetisme el trobem amb materials com la fusta, petroli, aigua, plàstics, alguns metalls com el Cu, Hg, Au, Bi i, especialment, en els superconductors.

Els materials diamagnètics repelen el camp magnètic, separant les línies de camp. Si bé en general aquest efecte és feble en la majoria de materials, en el cas dels superconductors és molt intens, i el podem apreciar fàcilment al fenomen de la ***levitació magnètica***.

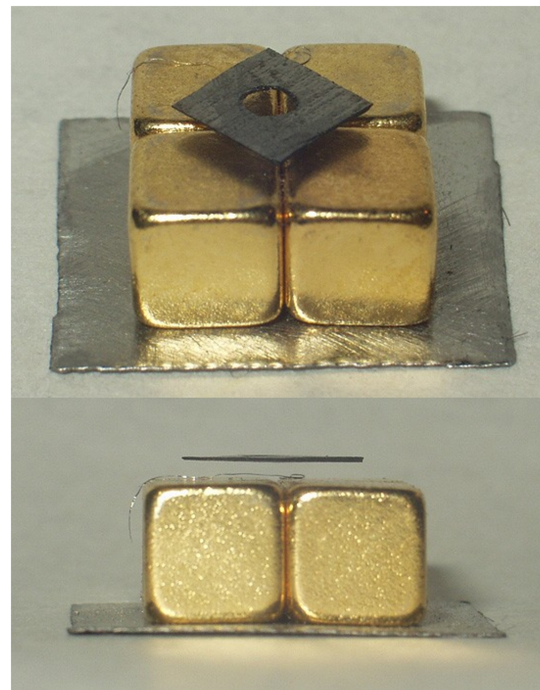


*Figura 66: **Levitació d'una làmina de grafit pirolític**. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1004783*

Ferromagnetisme

Alguns materials, com el Fe i el Ni, poden presentar magnetisme en absència d'un camp extern. Són els materials ferromagnètics, els constituents dels imants naturals, primera forma de magnetisme que va conèixer la humanitat.

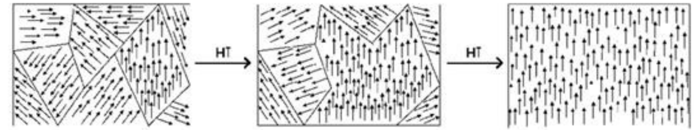


Figura 67: ***Creixement dels dominis magnètics a un material ferromagnètic***. *Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8979822*

Material	T_c (K)
Fe	1123
Co	1388
Ni	627
CrO_2	386
Fe_3O_4	858
NiO_2Fe_3	858
$CuOFe_2O_3$	728
MgO_2Fe_3	713
$Y_3Fe_5O_{12}$	560

A nivell microscòpic els seus constituents son imants naturals, però normalment estan desordenats, organitzats en petits dominis magnètics separats per fronteres (*parets de Bloch*) i distribuïts a l'atzar, donant una mitjana nul·la.

En aplicar un camp extern aquests dominis s'orienten, reforçant el camp magnètic de forma sorprenent. Quan deixem d'aplicar el camp extern, els dominis queden orientats i el material queda imantat.

Aquest ordre es perd de forma sobtada en augmentar la temperatura fins arribar a la *temperatura de Curie* T_c, característica del material.

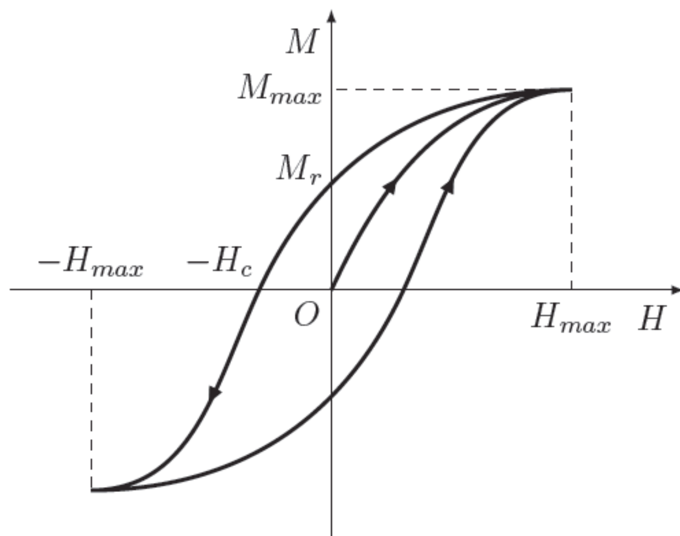


Figura 68: ***Magnetització d'un material ferromagnètic i cicle d'histèresi***. *Font: By TFra6 CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=55435443*

Quan apliquem el camp magnètic extern els dominis magnètics creixen i observem una magnetització cada vegada més gran, fins que arribem a un valor màxim M_{max}: la magnetització s'ha *saturat*, tenim un únic domini magnètic amb tots els petits imants orientats paral·lelament al camp i reforçant-lo. Quan treiem el camp queda una *magnetització romanent* M_r i cal aplicar un *camp coercitiu* H_c de sentit contrari per treure la magnetització. Si incrementem el camp contrari trobarem la saturació oposada, Aquest cicle s'anomena ***cicle d'histèresi***.

Si volem un canvi ràpid imant / no imant (nuclis d'electroimants com a un porter electrònic, nuclis de transformadors...) utilitzarem materials ferromagnètics *tous* amb un cicle d'histèresi petit. Si volem fabricar imants permanents utilitzarem materials *durs*, amb un gran cicle d'histèresi.

Assajos no destructius

Com podem examinar a fons un objecte sense fer-lo malbé? Aquesta és una de les àrees més apassionants de la ciència de materials, interès compartit per la medicina, per motius obvis.



Figura 69: ***La Ressonància magnètica nuclear (RMN) permet obtenir imatges de talls a diferents fondàries de forma innòcua. Utilitza un potent camp magnètic per alinear la magnetització nuclear dels àtoms i camps de radiofreqüència per a alterar sistemàticament l'alineació d'aquesta magnetització*** *. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46493124*

Per això no és d'estranyar que moltes de les tècniques d'exploració utilitzades a medicina també s'utilitzin a l'estudi de materials: examen visual, radiografies, termografies per infrarojos, ecografies per ultrasons, tomografia axial computada (TAC), imatges per RMN, interferometria làser, utilització de radioisòtops per gammagrafia i tomografia per emissió de positrons (PET), luminescència Cherenkov ...

Com veieu estem parlant d'un gran nombre de tècniques, que en el cas de la ciència de materials encara és molt més ampli: treballem amb un marge de mides molt més gran, sense les restriccions de treballar amb mostres vives, amb interès en moltes propietats ...

Assajos per corrents de Foucault

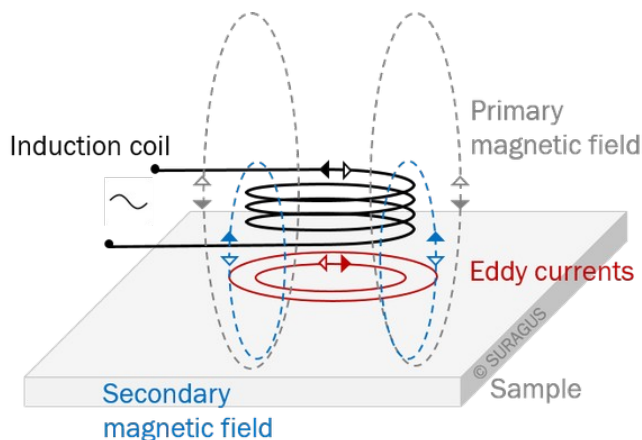


Figura 70: ***Assajos per corrents de Foucault (Eddie current testing, ECT).*** *Font: By Stefan Trache CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=93139890*

Les corrents de Foucault s'originen en mostres conductores per inducció (llei de Lenz), en aplicar un corrent altern a una bobina, que genera un camp magnètic, també altern.

La mesura d'aquests corrents permet detectar imperfeccions i defectes en l'estructura conductora, per la qual cosa s'utilitza molt en la inspecció de superfície i la inspecció de tubs, així com per mesurar el gruix de les capes de recobriment, o la profunditat de tractament.

La inspecció superficial s'utilitza àmpliament a la indústria aeroespacial i petroquímica. La tècnica és molt sensible i pot detectar esquerdes estretes.

La inspecció de tubs es limita generalment a tubs no ferromagnètics. La tècnica és molt sensible per detectar i dimensionar porus. Es poden detectar pèrdues de paret o corrosió, però la mida no és precisa.

Inspecció amb partícules magnètiques

Les discontinuïtats superficials als materials ferromagnètics i els seus aliatges es poden detectar magnetitzant el material i recobrint la peça amb partícules magnètiques. Aquestes són atretes per les discontinuïtats, posant-les de relleu.



Figura 71: ***Cerca de fractures a un cargol amb partícules magnètiques mullades i llum UV.***
Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12418627

S'utilitzen partícules de 5 a 170 µm per treballar amb llum blanca, però s'obté millor resolució amb partícules més petites de 0,5 µm amb pigments fluorescents mullades en oli o aigua i aplicant llum ultraviolada.

Inspecció per líquids penetrants

Aquesta tècnica s'utilitza en el cas de aliatges no fèrrics, o quan la inspecció per partícules magnètiques és difícil d'aplicar. Fins-i-tot es pot aplicar en alguns materials no metàl·lics. Per això aquesta tècnica és útil per molts tipus de materials, des de components aeronàutics fins plàstics, porcellanes o materials ceràmics com vaixelles domèstiques.

Aquesta tècnica consisteix en aplicar un líquid acolorit o fluorescent a la superfície, el qual penetra per capil·laritat a qualsevol discontinuïtat que tingui el material. Després d'un temps d'espera, s'elimina l'excés de líquid i s'aplica un revelador, que realça els defectes on ha penetrat el líquid. En funció del líquid empleat la inspecció es realitza amb llum blanca o ultraviolada. El principal desavantatge d'aquesta tècnica és que només mostra defectes superficials i no és aplicable a materials porosos.



Figura 72: ***Inspecció amb líquid penetrant de la integritat de peces d'aviació no ferromagnètiques.*** *Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30478696*

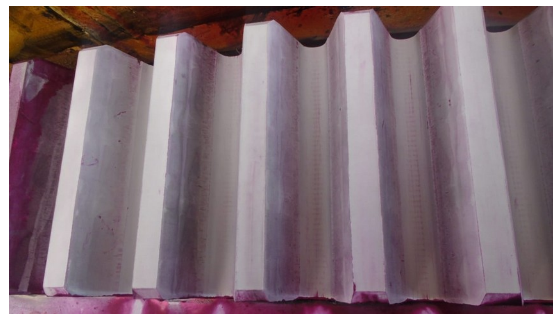


Figura 73: ***Inspecció amb liquid penetrant acolorit***. *Font: De MARCELANOELIA251 CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89675581*

Radiografia

La radiografia industrial, on es poden utilitzar exposicions als raigs X més intenses que a medicina, s'utilitza en soldadura, peces de fosa o inspecció de peces compostes, en inspecció d'aliments i control d'equipatges, en classificació i reciclatge, manteniment d'avions, balística, inspecció de turbines, en caracterització de superfícies, canonades, mesura de gruixos de recobriment ...

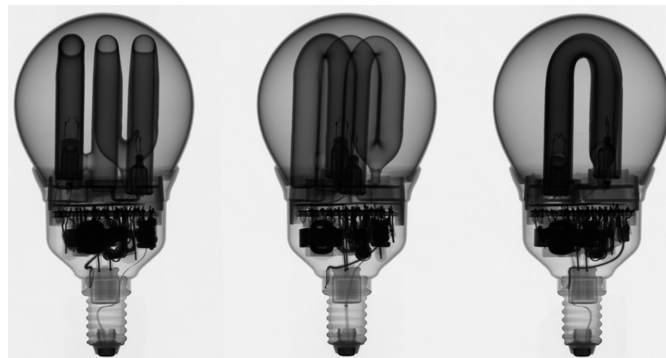


Figura 74: ***Control de qualitat industrial amb raigs X.*** *Font: By SecretDisc CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11621899*

Els raigs X es produeixen quan electrons altament accelerats per alta tensió xoquen amb electrons interns d'àtoms que són excitats a nivells superiors i emeten fotons d'alta energia en tornar al seu nivell inferior. Aquests raigs X travessen el material, amb diferents valors d'absorció, i impressionen el sensor.

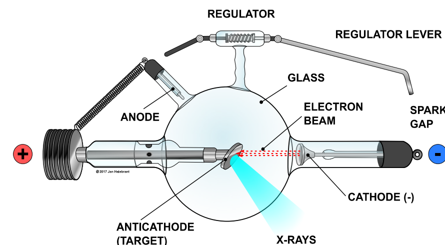


Figura 75: ***Emissió de raigs X a un tub de Crookes.*** *Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=93503736*

Inspecció per ultrasons

Els equips d’ultrasons, tan utilitzats a medicina a les ecografies, permeten detectar discontinuïtats superficials, subsuperficials i internes. S’utilitzen freqüències entre el 250 kHz i els 25 MHz, generades per un transductor piezoelèctric. Les vibracions generades travessen el material, que atenua el senyal i , en arribar a la frontera del material, és reflectit. L'eco és rebut pel mateix o un altre transductor i enregistrat.

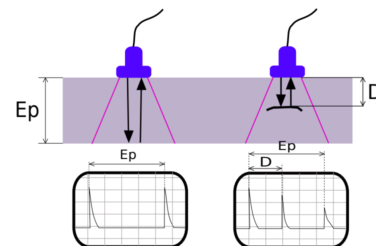


Figura 76: ***Principi de funcionament de la inspecció per ultrasons. El temps de tornada del senyal depèn de la distància on rebota.*** *Font: Romary CC BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=997839*

Aquesta tècnica té com a avantatges la seva sensitivitat, el seu gran poder de penetració, generalment únicament necessita accés a la superfície de la mostra, alta precisió en la mesura de defectes interns, és portable i els resultats són immediats.

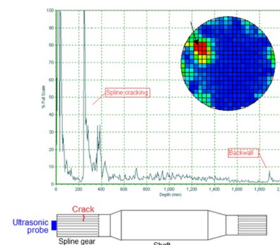


Figura 77: ***Inspecció per ultrasons que mostra la fractura d'una peça.*** *Font: By LightYear, CC BY-SA 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17847177*

Com a principal desavantatge la necessitat d’utilitzar algun mitjà per acoblar acústicament el transductor a la mostra.

Altres tipus d'assajos no destructius

Només hem vist les tècniques més utilitzades, però n'hi ha moltíssimes, i contínuament s'inventen de noves.

Trobareu informació detallada de moltes d'elles a la Viquipèdia [WP2020a] (Edició anglesa).

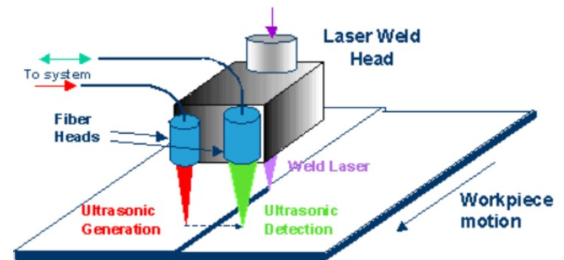


Figura 79: ***Inspecció amb làser ultrasonic.*** *Font: By Fede Bandi 91 CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80177839*

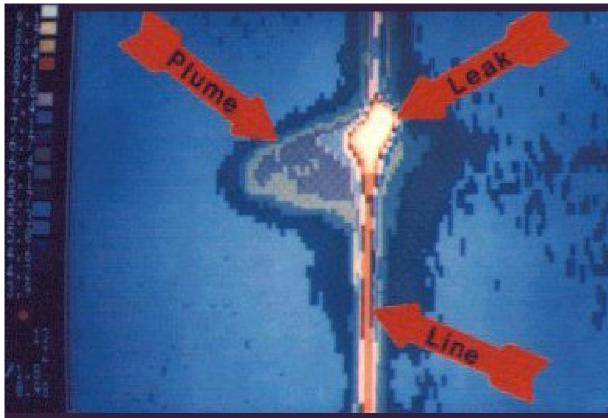


Figura 78: ***Termograma aèria d'una canonada soterrada que mostra la contaminació subterrània causada per una fuita.*** *Font: By NDTSociety CC BY-SA 3.0, https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=19427528*

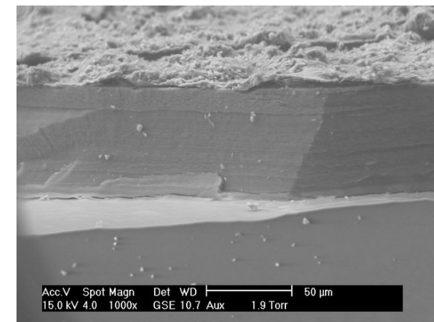


Figura 80: ***Imatge de microscopia d'escànner electrònic que mostra la capa de corrosió a un fragment de vidre antic.*** *Font: https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=12263029*

. Materials tecnològics

Com podreu esbrinar, molts són el materials utilitzats i diversos els processos d'obtenció d'aquests materials i les formes de conformar-los.

Farem una revisió dels més utilitzats o interessants, aprofundint en aquells aspectes rellevants que permetin tenir una visió de conjunt per aconseguir aquella *cultureta* imprescindible que tot enginyer o científic ha de tenir. Naturalment, des d'un punt de vista subjectiu d'aquest autor.

Metal·lúrgia

Els metalls ocupen un lloc privilegiat, han estat claus en el desenvolupament de la nostra societat. Només cal recordar els darrers períodes prehistòrics: edat del coure, edat del bronze, edat del ferro.

Arribar al ferro és un altre nivell. La seva abundància, propietats i tractaments el converteixen en un material d'ús quotidià, encara avui en dia. No és d'estranyar que dins de la ciència de materials el seu estudi tingui nom propi, la *siderúrgia*.

Ferro, acer i fosa

Si recordem els procés de nucleosíntesis als estels, no ens ha d'estranyar que el trobem en un 5% a l'escorça terrestre.

La seva abundància, procés d'obtenció, tenacitat, mal·leabilitat i ferromagnetisme a temperatura ambient, expliquen el seu ús quotidià, especialment dels seus aliatges, els acers i les foses.

Recordem que els acers tenen menys d'un 2,1 % de C, per sobre tenim les foses, fins a un 6,67 % de C. Així com els acers es poden conformar per forja, les foses només per emmotllament.

Formes al·lotròpiques del ferro

Fase	Temperatura	Xarxa	Magnetisme
α	T < 788 °C	BCC	ferromagnètic
α[1]	788 °C – 910 °C	BCC	paramagnètic
γ	910 °C – 1400 °C	FCC	paramagnètic
δ	1400 °C – 1539 °C	BCC	paramagnètic

Propietats del ferro

Densitat: 7,874 g/cm^3
Punt de fusió: 1538 °C
λ : 80,4 W/m·°C
α : 11,8·10^{-6} °C^{-1}
ρ: 96,10·10^{-3} μΩ·m

E: 110 GPa
σ_E : 130 MPa
R_M : 260 MPa
ε : 45 %
Duresa : 490 HB

1 *Abans la fase α del ferro per sobre dels 788 °C, temperatura en que el ferro passa de ser ferromagnètic a paramagnètic, es denominava fase β. Avui en dia aquest nom és obsolet, ja que no hi ha canvis estructurals a la xarxa.*

La forja consisteix en donar forma a l’acer escalfat colpejant amb el martell, normalment sobre una enclusa. En calent l’acer és més plàstic.



*Figura 81: **Forja de l'acer.** Font: By Wasapl CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16376418*

Del diagrama Fe-C podem observar que les foses tenen un punt de fusió (>1130 °C) inferior al dels acers (>1400 °C).

Les foses presenten molta resistència als esforços de compressió, però no a tracció i xoc.

En canvi l’acer suporta molt bé tot tipus d’esforç. A més a més, podem canviar les propietats de l’acer mitjançant tractaments tèrmics. Per exemple, en el procés de la forja és habitual refredar ràpidament les peces d’acer en un cossi amb aigua, per trempar-les. Com veurem més endavant, el tremp millora la duresa de l’acer, a costa d’incrementar també la fragilitat.

És molt freqüent afegir a l'acer altres elements a banda del carboni. Per exemple, l'*acer inoxidable* 18-10 utilitzat en la majoria de coberteries porta un 18 % de Cr i un 10 % de Ni. Per la fabricació d'eines s'afegeix vanadi per incrementar la duresa i resistència a la tracció a alicates i tornavisos o tungstè (*acers ràpids*) per suportar les altes temperatures a broques i freses.

Al llarg de la història diverses vegades les propietats d'un acer concret s'han obtingut per casualitat, bé per la forma d'obtenir-lo o de conformar-lo. És el cas del *ferro bo*, que es produïa a les fargues del nostre país i que va aconseguir fama mundial. Avui en dia trobem armes fetes a Ripoll a museus de tot el món.

La utilització de carbó vegetal, amb molt poc sofre, a la *farga catalana*, procés utilitzat a l'edat mitjana i millorat al segle XVII, donaven a l'acer, baix en carboni i fòsfor, una qualitat inigualable a aquella època.

Un altre cas són els *acers de Damasc*, emprats a l'Orient Mitjà en espases des del 1100 aC fins al 1700. La tècnica es va perdre fa segles, però sembla que recentment s'ha recuperat el *know-how*. Aquestes llegendàries espases són conegudes per la seva duresa i tall etern. Diferents teories s'han proposat per explicar les seves propietats, la darrera d'elles especula sobre la formació de nanotubs de carboni a la seva estructura.

La farga catalana

Aquesta va ser utilitzada des de l'edat mitjana. L'aigua tenia un paper important: per una banda, com a font d'energia, per moure els *martinets* amb una roda hidràulica. Però al segle XVII es va introduir una notable millora: també s'utilitzava per incrementar el flux d'aire, i per tant d'oxigen, al forn, gràcies a unes *trompes* que, per *efecte Venturi*, aconseguien una gran pressió d'aire a la *caixa dels vents*, que es regulava i dirigia cap al forn, on la mena de ferro (minerals amb alt contingut d'òxid de ferro) s'apilava en capes alternades amb capes de carbó vegetal. Gràcies a les trompes el forn arribava a temperatures de 1000 °C.



Figura 82: ***Martinets de la Farga Palau (Ripoll). Una roda hidràulica transmet el moviment a unes lleves que fan pujar i deixen caure de cop els martinets, utilitzats per fracturar la mena i per forjar el metall.*** *Font: Alejo Pineda*

Els minerals de ferro emprats son òxids, la mena més abundant. El carboni és la clau per reduir, es a dir, eliminar l'oxigen del ferro. Això s'aconsegueix amb l'alta temperatura del forn i el flux incrementat d'oxigen. Es produirà CO_2 per dues reaccions: per una banda per la crema del calor vegetal amb l'oxigen de l'aire, per l'altra banda per la reducció dels òxids de ferro. Una part del carboni es dissoldrà amb el ferro, obtenint un acer homogeni d'alta qualitat, el *ferro bo*.



Figura 83: ***Trompes a la Farga Palau (Ripoll).*** *Font: Moisés Sánchez.*

Amb els martinets es picava el *masser* obtingut: un bloc incandescent bàsicament de ferro. Amb els cops dels martinets es separava l'*escòria* de la massa esponjosa de ferro, a la vegada que se li donava forma.



Figura 84: ***Caixa dels vents a la Farga Palau (Ripoll)****. Font: Adrià Rocamora,*

Si bé els alts forns obtenen ferro colat a un preu inferior que l'acer de la farga catalana, no van aconseguir reemplaçar-la fins l'aparició dels convertidor Bessemer al segle XIX.

Alts forns i el convertidor Bessemer

Actualment el ferro s’obté en forma de ferro colat (fosa) als alts forns, i necessita d’un tractament posterior si el que volem és obtenir acer.

A l’alt forn s’introdueixen per la part superior la mena amb el carbó de coc, que té baix contingut en sofre, i pedra calcària, $CaCO_3$. La crema del coc allibera calor i CO, que redueix la mena. La pedra calcària permet la separació del SiO_2 present a la mena, ja que l’escòria amb el $CaSiO_3$ sura sobre el ferro colat i és eliminada. El ferro colat resultant té una composició d’un 92 % Fe, d’un 3 a 4 % C , 0,5-2,5 % Mn i 0,04-2 % P.

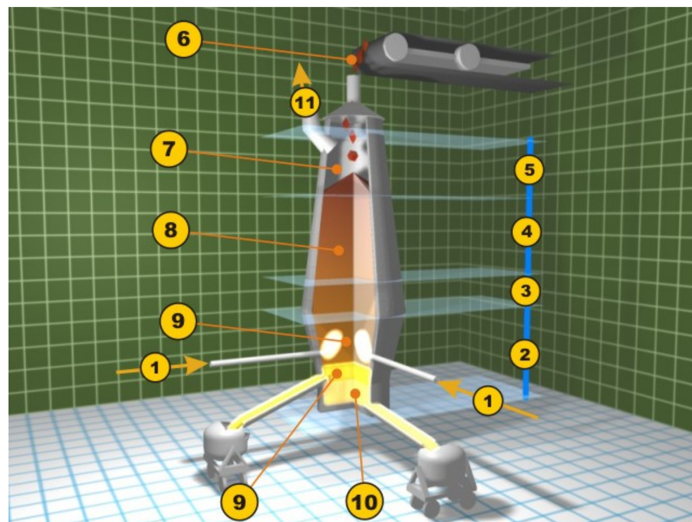


Figura 85: ***Diagrama alt forn 1. Aire prescalfat 2. Zona de fusió 3. Zona de reducció dels òxids de ferro 4. Zona de reducció de l’òxid ferric 5. Zona de prescalfament 6. Entrada de mena, pedra calcària i coc 7. Gasos sortints 8. Columna de mena, coc i pedra calcària 9. Estracció de l'escòria 10. Sortida del ferro colat 11. Recollida de gasos.*** *Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=191529*

Aquesta fosa produïda a l’alt forn es pot utilitzar directament o convertir-la en acer. El primer procés rendible de conversió en acer de la fosa va ser el *convertidor Bessemer* (1855): un recipient amb parets refractàries amb una única obertura superior i un mecanisme que permet inclinar-lo per la descàrrega. A la part inferior té uns orificis per injectar aire a l’interior. Una vegada carregat amb el ferro colat a alta temperatura l’oxigen present a l’aire injectat provoca la descarburació de la fosa i la seva conversió en acer.

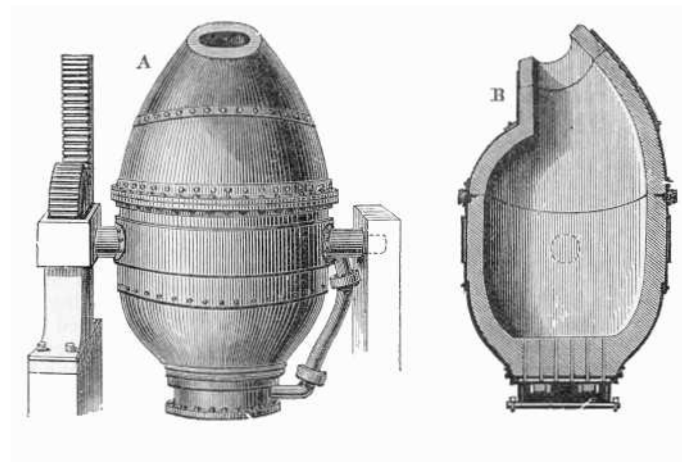


Figura 86: ***Esquema d'un convertidor Bessemer****. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=91836*

Tractaments tèrmics de l'acer

Ja hem vist al diagrama Fe-C que per altes temperatures (T > AC_3) els acers agafen l'estructura austenita amb el carboni ocupant espais intersticials a la xarxa FCC i a temperatures baixes (T < AC_1) aquest carboni el trobem en forma de Fe_3C (perlita, cementita) a una xarxa BCC de ferrita.

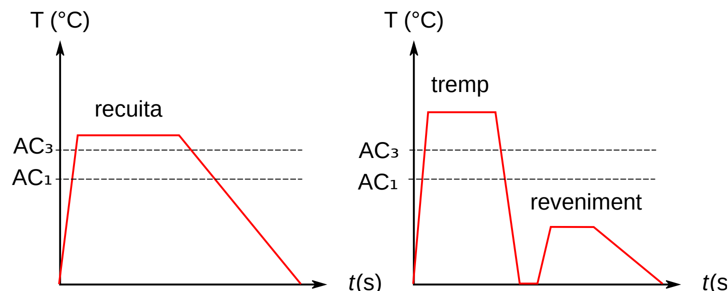


Figura 87: ***Tractaments tèrmics. AC1 és la temperatura de transformació de l'austenita en perlita, AC3 és la temperatura de formació de l'austenita (veure el diagrama de fases de Fe-C)****. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29951716*

El ***tremp*** és un tractament tèrmic típic de l'acer on es supera AC3 i es deixa un temps per estabilitzar l'austenita, amb un ràpid refredament posterior per sota d'AC_1 que impedeix la difusió del carboni de forma que l'austenita es transforma en *martensita*, una xarxa tetragonal centrada al cos supersaturada de carboni.

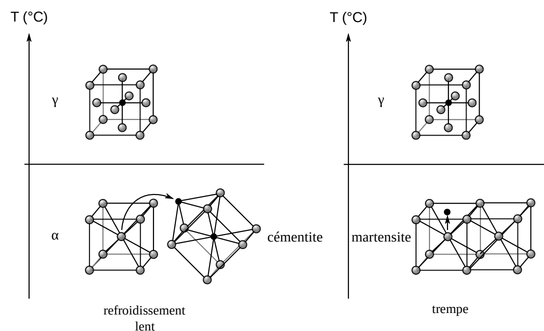


Figura 88: ***Refredament lent o ràpid (tremp) de l'austenita.*** *Font: Cdang CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15094840*

L'acer trempat així obtingut té una duresa (i fragilitat) superior a l'acer perlític que típicament correspon a la mateixa temperatura i composició.

Com el tremp origina altes tensions a la xarxa, típicament s'aplica després un tractament de ***reveniment***: s'escalfa l'acer per sota d'AC_1 i es deixa refredar lentament per eliminar defectes a la xarxa, incrementa la tenacitat sense perdre duresa.

Un altre tractament típic és la ***recuita***: s'escalfa l'acer per sobre d'AC_3 i es deixa refredar lentament, incrementant l'elasticitat i facilitant el mecanitzat de l'acer perlític. Aquest tractament no és exclusiu dels acers.



Figura 89: ***Enduriment diferencial. Una katana mostra una línia ondulada brillant (nioi) que separa el tall martensític de la zona perlítica. El nucli de la katana és de ferro gairebé pur: no és dur, però tampoc és fràgil. D'aquesta forma s'aconsegueixen les propietats desitjades a cadascuna de les zones de la katana.*** *Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15107719*

Coure, llautons i bronzes

El **coure** destaca per la seva alta conductibilitat elèctrica i tèrmica, així com la seva ductilitat. Per tot això s'utilitza, en cablejats elèctrics, plaques de circuit imprès, canonades, intercanviadors de calor, antics recipients de cuinar ...

El **llautó** (Cu-Zn) és més dur que el coure, i fàcil de fondre, gravar o mecanitzar. Resistent a l'oxidació i mal·leable. S'utilitza a contactes elèctrics (interruptors, escombretes, portabombetes ...), monedes, poms de portes, panys i claus, maquinària diversa, instruments científics, objectes de color daurat ...

Els **bronzes** són aliatges on predomina el coure i l'estany. Son resistents al frec i la corrosió.

Si bé els bronzes presenten corrosió superficial, aquesta *pàtina* actua de pell protectora protegint la resta de la peça, i no s'ha d'eliminar.

Per aquest motiu els bronzes són utilitzats en monedes, estàtues, molles i altres peces mecàniques. Fins-i-tot resisteixen la corrosió marina, sent molt útils per instruments, hèlixs i altres peces de vaixells.

Cal destacar també la seva sonoritat, són imprescindibles en campanes, gongs, saxofons ...

Com no produeixen guspires en colpejar, martells i d'altres eines per a ambients inflamables es fabriquen amb bronzes.

Alumini, duralumini i aliatges lleugers

Les principals característiques de l'alumini són la seva baixa densitat (2,7 g/cm^3), alta mal·leabilitat (~ µm) i resistència a la corrosió (*passivació*: es forma una capa superficial molt prima ~ 5 nm d'òxid que el protegeix).

El seu principal inconvenient és la dificultat de la seva obtenció: l'òxid d'alumini té un punt de fusió de 2072 °C. A finals del segle XIX es va aconseguir baixar aquesta temperatura amb criolita, permeten la separació de l'alumini per electròlisi. El procés té un gran impacte ambiental: el reciclatge de l'alumini és prioritari.

S'utilitza pur en embalatges alimentaris i cables.

Les seves propietats mecàniques milloren amb el duralumini, aliatge amb Cu (0,45%-1,5%) Mg (0,45%-1,5%) Mn (0,6%-0,8%) i Si (0,5%-0,8%). Amb més d'un 95 % d'alumini, el duralumini aconsegueix amb aquestes petites quantitats d'altres metalls una gran millora de les propietats mecàniques[MG1998a]:

Propietat	Alumini	Duralumini	Unitats
Resistència al trencament	55	500	MPa
Límit elàstic	17	420	MPa
Duresa	20	135	n HB

L'alumini és l'element principal dels aliatges lleugers, utilitzats en la indústria aeronàutica.

Magnesi i aliatges ultralleugers

El magnesi té una densitat encara més petita (1,74 g/cm^3) que l'alumini, sent la base dels aliatges ultralleugers. Si bé la passivació les protegeix de la corrosió, es deteriora fàcilment en ambients salins, com la proximitat al mar. Per altra banda té un mòdul d'elasticitat baix i no resisteix la fatiga. S'utilitza principalment en la indústria aeroespacial, maquinària d'alta velocitat, pals de golf, arcs i fletxes, i en estructures ultralleugeres.

També s'utilitza en flaixos fotogràfics, pirotècnia, donada la seva violenta combustió (3100 °C), que requereix extintors específics per a la seva extinció. També s'utilitza com a pedra foguera, ja que crea espurnes, i per encendre la termita.

Aquesta perillositat ha provocat diferents accidents importants: focs en els motors dels bombarders B-29, o el pitjor accident de la història en les carreres de cotxes quan el 11/06/1955 un Mercedes-Benz 300 SLR, que tenia el xassís d'aliatge ultralleuger, va provocar en xocar 83 morts i 180 ferits entre els espectadors de les 24 h de Le Mans. Per aquest motiu en l'actualitat els nanotubs de carboni i diversos polímers han substituït els aliatges ultralleugers en moltes aplicacions estructurals.

Actualment s'utilitza àmpliament en electrònica mòbil: tauletes, mòbils, ordinadors portàtils, càmeres ...

Titani

El titani reuneix una sèrie de propietats que el fan únic en moltes aplicacions: més lleuger (4,5 g/cm^3) que l'acer, té propietats mecàniques comparables; alta resistència a la corrosió (passivació), fins-i-tot a l'aigua salada; fisiològicament inert, és biocompatible; resistent a molts àcids a temperatura ambient i a les bases a qualsevol temperatura; elevat punt de fusió (1670 °C); refractari ...

Si comparem la seva resistència al trencament o la seva duresa amb el seu pes trobem un avantatge inigualable sobre la resta de metalls.

És relativament abundant, però car d'obtenir.

Per tot això s'utilitza en moltes aplicacions: hèlixs de vaixells, àleps de turbines, motors a reacció, bombes de cors artificials, caixes de marcapassos, avions, míssils, satèl·lits artificials, broques, bicicletes, pròtesis, implants dentals, cirurgies, píercings, intercanviadors de calor amb aigua salada, vàlvules, articles esportius o d'acampada, armes, ordinadors portàtils, ulleres, joieria... El 50% dels aliatges utilitzats en avions són del tipus Ti-6Al-4V (90% Ti, 6% Al, 4% V).

Malgrat totes aquestes aplicacions, el 95 % del mineral de titani s'utilitza per obtenir TiO_2, un pigment utilitzat en pintures, paper, pasta de dents, plàstics i moltes altres aplicacions.

Plom

El plom és un metall pesat (11,34 g/cm3), amb un punt de fusió baix, tou i molt mal·leable.

Si bé al llarg de la història ha estat empleat en moltes aplicacions, la seva toxicitat (*saturnisme*) l'ha desplaçat a només aquelles aplicacions en que és imprescindible (normativa RoHS). La seva inhalació, ingesta o contacte amb la pell són molt perilloses, fins-i-tot mortals, afectant al cervell i els ronyons.

Antigament s'utilitzava en cosmètica, monedes, vaixelles, canonades, projectils, fusibles, vitralls, pigments, pintures, plomades, pesos per bussos, joguines, perdigons, soldadura tova, impremtes, combustibles, recipients per alimentació...

Aquesta diversitat d'aplicacions ha quedat en el nostre llenguatge: «farcir de plom», «aquest home és un plom», «han saltat els ploms», «posar-se els ploms», «anar amb peus de plom», «perdre el plom», «a plom»... Fins i tot en anglès s'utilitza *plumbery* per lampista.

Actualment encara s'utilitza en bateries (principal aplicació, no hauria d'haver contacte amb l'usuari), municions, blindatges, barreres impermeables i acústiques (el plom no té freqüències de ressonància naturals), producció d'àcid sulfúric i especialment com a protector en front de la radiació γ (típicament 1 cm de plom redueix un 50% la radiació γ incident).

Aplicacions d'altres metalls

Estany: soldadura electrònica (baix punt de fusió), llaunes (recobriment contra la corrosió), miralls.

Zinc: protecció per galvanitzat contra la corrosió de cargols, femelles i volanderes (acer zincat).

Níquel: protecció contra la corrosió. Acumuladors. Monedes. Superaliatges molt interessants: **Alnico** (imants), **monel** (motors marins), **mu-metall** (apantallament magnètic), **nitinol** (memòria de la forma), **permalloy**, **nikrotal**, **invar**...

Crom: cintes magnètiques, protecció contra la corrosió (cromat) d'aixetes, poms, llantes, vehicles ... Superaliatges per motors a reacció i turbines de gas.

Tungstè: filaments de bombeta (temperatura de fusió 3422 °C), resistències de forns elèctrics, roba ignífuga. Donat el seu alt punt de fusió cal utilitzar tècniques de *pulverimetal·lúrgia* per conformar-lo.

Tàntal: condensadors en miniatura, implants, aliatges per a altes temperatures.

Niobi: fabricació d'imants superconductors, dispositius de comunicacions òptiques.

Neodimi: imants permanents potents $Nd_2Fe_{14}B$, discs durs, auriculars, altaveus, micròfons, ascensors, equips d'aire condicionat, motors elèctrics de vehicles híbrids, dinamos d'aerogeneradors, làsers Nd:YAG.

Plàstics

Termoplàstics

Altres materials

Composits

Nous materials

Grafè

Bibliografia

AS01: Donald R. Askeland (2001) " Ciencia e ingeniería de los materiales". Pàgs.150. Paraninfo. ISBN:84-9732-016-6
FE1959: Richard Feynman, There's Plenty of Room at the Bottom, 1959, http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html
MG1998a: Joan Joseph et al (1998) " Tecnologia Industrial I". Pàgs.206-207. McGraw-Hill. ISBN:84-481-1308-X
PT2020: Michael Dayah , Ptable: Periodic Table, 1997, https://ptable.com/?lang=ca
SH98: James F. Shackelford (1998) " Introducción a la Ciencia de Materiales para ingenieros". Pàgs.282. Prentice Hall. ISBN:84-8322-047-4
WP2020: Wikipedia contributors, List of named alloys, 2020, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_named_alloys
WP2020a: Wikipedia contributors, Nondestructive testing, 2020, https://en.wikipedia.org/wiki/Nondestructive_testing

Índex d'il·lustracions